

Treball de Fi de Grau

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Estudi aerodinàmic de la part frontal d'un vehicle**

**MEMÒRIA**

**Autor:** Adrián González López  
**Director:** Esteve Jou Santacreu  
**Convocatòria:** Juny 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resum

El present projecte pretén estudiar l'aerodinàmica d'un vehicle, principalment de la seva part frontal, mitjançant CFD amb el programa ANSYS Workbench i té, com a finalitat docent, la creació d'una pràctica pels alumnes de l'assignatura d'aerodinàmica del màster d'automoció impartit a l'ETSEIB.

D'aquesta manera, aquest projecte ha servit per crear el guió de dita pràctica en el qual es basaran els alumnes per a la realització de la mateixa i que es troba als Annexos.

No obstant això, abans de la realització d'aquest guió, s'han realitzat els estudis aerodinàmics d'un prototip de vehicle convencional inventat i d'un prototip de vehicle esportiu, concretament del Chevrolet Camaro SS del 2015, per veure les diferències aerodinàmiques existents entre ambdós models.

Seguidament, s'ha procedit a incorporar un spoiler al prototip de vehicle convencional i s'ha extret el difusor al prototip de vehicle esportiu per tal de veure els efectes d'aquests dos elements en els diferents prototips.

Finalment, un cop realitzats els diferents estudis aerodinàmics i observats els successos produïts en cadascun dels prototips, s'ha procedit a la creació del manual per a la realització de la pràctica.

## Agraïments

*A la meva família, per tot el suport rebut durant aquesta etapa d'estudis a la universitat tant en els moments bons com en els no tan bons. En especial a la meva germana petita, que tants ànims m'ha donat. Gràcies també per confiar sempre i, especialment en aquest projecte, en les meves capacitats com a futur enginyer.*

*Als meus amics i amigues, perquè sense ells hagués sigut impossible acabar el Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials, per la quantitat de problemes que hem resolt junts, la quantitat de coneixements que hem après junts i l'empatia en els estudis, així com els moments de desconexió i la capacitat de fer que el temps passi més ràpid.*

*A Esteve Jou, tutor d'aquest projecte i coordinador de l'assignatura Dinàmica de Fluids, ja que va ser després d'haver cursat l'assignatura amb ell quan em vaig adonar de quina era la branca de l'enginyeria que més m'agradava, l'automoció. Respecte el projecte en qüestió, agrair els consells, solucions i coneixements que m'han sigut aportats.*

*En definitiva, gràcies a totes les persones que heu fet possible la realització d'aquest projecte i que hagi arribat on em trobo actualment.*

# Sumari

|   |    |
|---|----|
| Resum.....  | 1  |
| Agraïments .....  | 2  |
| 1. Motivació i abast .....                                    | 9  |
| 2. Objectius del projecte .....                               | 10 |
| 3. Introducció a l'aerodinàmica.....                          | 11 |
| 4. Resistència a l'avanç.....                                 | 15 |
| 5. Primer model: prototip cotxe convencional .....            | 19 |
| 5.1. Geometria.....   | 19 |
| 5.2. Condicions de contorn.....                               | 21 |
| 5.3. Mallat i resultats obtinguts.....                        | 23 |
| 5.3.1. Primer mallat .....                                    | 24 |
| 5.3.1.1. Camp de pressions .....                              | 26 |
| 5.3.1.2. Camp de velocitats.....                              | 28 |
| 5.3.1.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics .....    | 30 |
| 5.3.2. Segon mallat .....                                     | 31 |
| 5.3.2.1. Camp de pressions .....                              | 34 |
| 5.3.2.2. Camp de velocitats.....                              | 35 |
| 5.3.2.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics .....    | 37 |
| 5.3.3. Tercer mallat .....                                    | 38 |
| 5.3.3.1. Camp de pressions .....                              | 41 |
| 5.3.3.2. Camp de velocitats.....                              | 42 |
| 5.3.3.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics .....    | 44 |
| 5.4. Anàlisi del prototip variant la inclinació del capó..... | 46 |
| 5.4.1. Inclinació de 5° .....                                 | 46 |
| 5.4.2. Inclinació de 0° .....                                 | 48 |
| 5.4.3. Comparativa segons la inclinació.....                  | 50 |
| 5.5. Anàlisi del prototip afegint un spoiler davanter.....    | 51 |
| 5.5.1. Descripció de l'spoiler .....                          | 51 |



|   |    |
|---|----|
| 5.5.2. Camp de pressions .....  | 54 |
| 5.5.3. Camp de velocitats .....   | 55 |
| 5.5.4. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics.....                 | 56 |
| 6. Segon model: prototip cotxe esportiu .....                           | 58 |
| 6.1. Geometria.....   | 58 |
| 6.1.1. El fons pla .....  | 59 |
| 6.2. Mallat.....  | 62 |
| 6.3. Resultats obtinguts .....  | 66 |
| 6.3.1. Camp de pressions .....  | 66 |
| 6.3.2. Camp de velocitats .....   | 67 |
| 6.3.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics.....                 | 72 |
| 6.4. Estudi del model sense difusor .....                               | 74 |
| 6.4.1. Camp de pressions .....  | 74 |
| 6.4.2. Camp de velocitats .....   | 75 |
| 6.4.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics.....                 | 76 |
| 7. Anàlisi de resultats .....   | 78 |
| 7.1. Model convencional sense spoiler i model esportiu amb difusor..... | 78 |
| 7.2. Model convencional amb spoiler.....                                | 79 |
| 8. Planificació .....   | 81 |
| 9. Impacte econòmic .....   | 82 |
| 10. Impacte ambiental .....   | 84 |
| 11. Conclusions .....   | 85 |
| 12. Bibliografia .....  | 86 |

## Sumari d'Annexos

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Manual de la pràctica ..... | 1 |
|-----------------------------|---|

## Llistat de figures

Figura 1: Comportament aerodinàmic d'un cotxe

Figura 2: Representació d'un túnel de vent

Figura 3: Distribució de pressions en un cotxe convencional

Figura 4: Valor del  $c_D$  en funció del disseny frontal i del darrera del vehicle

Figura 5: Variació del  $c_D$  segons l'angle d'inclinació del parabrises

Figura 6: Representació de la convexitat del sostre d'un vehicle

Figura 7: Part inferior d'un vehicle

Figura 8: Geometria del prototip de cotxe convencional creada mitjançant CAD

Figura 9: Geometria del prototip de cotxe convencional acotada

Figura 10: Volum de control utilitzat pel prototip de cotxe convencional

Figura 11: Condicions de contorn aplicades al volum de control

Figura 12: Primer mallat del volum de control del prototip de cotxe convencional

Figura 13: Detall del primer mallat

Figura 14: Representació de l'aspect ratio del primer mallat

Figura 15: Representació de l'skewness del primer mallat

Figura 16: Distribució de pressions del primer mallat

Figura 17: Camp de velocitats del primer mallat

Figura 18: Vectors velocitat del primer mallat

Figura 19: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del primer mallat

Figura 20: Línies de corrent del primer mallat

Figura 21: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del primer mallat

Figura 22: Segon mallat del volum de control del prototip de cotxe convencional

Figura 23: Detall del segon mallat

Figura 24: Representació de l'aspect ratio del segon mallat

Figura 25: Representació de l'skewness del segon mallat

Figura 26: Distribució de pressions del segon mallat

Figura 27: Camp de velocitats del segon mallat

Figura 28: Vectors velocitat del segon mallat

Figura 29: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del segon mallat

Figura 30: Línies de corrent del segon mallat

Figura 31: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del segon mallat

Figura 32: Tercer mallat del volum de control del prototip de cotxe convencional

Figura 33: Detall del tercer mallat

Figura 34: Representació de l'aspect ratio del tercer mallat

Figura 35: Representació de l'skewness del tercer mallat

Figura 36: Distribució de pressions del tercer mallat

Figura 37: Camp de velocitats del tercer mallat

Figura 38: Vectors velocitat del tercer mallat

Figura 39: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del tercer mallat

Figura 40: Línies de corrent del tercer mallat

Figura 41: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del tercer mallat

Figura 42: Distribució de pressions del prototip amb una inclinació del capó de  $5^\circ$

Figura 43: Camp de velocitats del prototip amb una inclinació del capó de  $5^\circ$

Figura 44: Distribució de pressions del prototip amb una inclinació del capó de  $0^\circ$

Figura 45: Camp de velocitats del prototip amb una inclinació del capó de  $0^\circ$

Figura 46: Valor obtingut del  $c_D$  respecte la inclinació  $\alpha$  del capó

Figura 47: Valor real del  $c_D$  respecte la inclinació  $\alpha$  del capó

Figura 48: Geometria de l'spoiler creada mitjançant CAD

Figura 49: Geometria de l'spoiler acotada

Figura 50: Croquis de la geometria del prototip de cotxe convencional amb spoiler creat mitjançant CAD

Figura 51: Geometria del prototip de cotxe convencional amb spoiler creada mitjançant CAD

Figura 52: Distribució de pressions del prototip amb spoiler

Figura 53: Camp de velocitats del prototip amb spoiler

Figura 54: Vectors velocitat del prototip amb spoiler

Figura 55: Línies de corrent del prototip amb spoiler

Figura 56: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del prototip amb spoiler

Figura 57: Geometria del Chevrolet Camaro SS creada mitjançant CAD

Figura 58: Geometria del Chevrolet Camaro SS vista de perfil

Figura 59: Geometria del prototip de cotxe esportiu creada mitjançant CAD

Figura 60: Fons pla del Chevrolet Camaro SS

Figura 61: Difusor del Chevrolet Camaro SS

Figura 62: Geometria d'un difusor típic d'un vehicle esportiu

Figura 63: Mallat del volum de control del prototip de cotxe esportiu

Figura 64: Detall del mallat del prototip de cotxe esportiu vist de perfil

Figura 65: Detall del mallat del prototip de cotxe esportiu vist des d'un cert angle

Figura 66: Tall d'una secció del mallat del prototip de cotxe esportiu

Figura 67: Representació de l'aspect ratio del mallat del prototip de cotxe esportiu

Figura 68: Representació de l'skewness del mallat del prototip de cotxe esportiu

Figura 69: Distribució de pressions del prototip de cotxe esportiu

Figura 70: Camp de velocitats del prototip de cotxe esportiu

Figura 71: Vectors velocitat del prototip de cotxe esportiu

Figura 72: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del prototip de cotxe esportiu

Figura 73: Plans creats a la zona del deixant del prototip de cotxe esportiu

Figura 74: Distribució de velocitats representada al primer pla

Figura 75: Distribució de velocitats representada al segon pla

Figura 76: Distribució de velocitats representada al tercer pla

Figura 77: Distribució de velocitats representada al quart pla

Figura 78: Línies de corrent del prototip de cotxe esportiu

Figura 79: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del prototip de cotxe esportiu

Figura 80: Distribució de pressions del prototip sense difusor

Figura 81: Camp de velocitats del prototip sense difusor

Figura 82: Línies de corrent del prototip sense difusor

Figura 83: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del prototip sense difusor

Figura 84: Distribució de pressions real d'un cotxe convencional amb i sense spoiler

Figura 85: Distribució de pressions obtinguda del prototip de cotxe convencional amb spoiler

# 1. Motivació i abast

Aplicar els coneixements adquirits durant els estudis del grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials ha sigut la base que ha despertat les inquietuds pel món de l'automoció.

Inicialment, la idea d'aquest projecte era tractar sobre l'estudi aerodinàmic d'un monoplaça de fórmula 1 i la creació d'un nou element que millorés aquest aspecte.

Amb aquesta idea al cap, es va decidir comentar-ho al professor i coordinador de l'assignatura de Mecànica de Fluids amb la intenció que fos el tutor d'aquest projecte de fi de grau i, un cop parlat i comentada la idea sobre el tema del projecte, degut a la complicació de l'obtenció d'informació per aquest tipus de vehicles i les limitacions de la versió estudiantil del programari ANSYS a l'hora de realitzar el mallat dels models i fer les simulacions, es va decidir canviar el tema del projecte per l'estudi aerodinàmic d'un vehicle convencional i un vehicle esportiu.

A més, aquest projecte tindria la finalitat docent de crear el manual per a la realització de les pràctiques docents de l'assignatura d'aerodinàmica esmentada a l'apartat anterior.

D'aquesta manera, el resultat final d'aquest projecte serà la proposta del manual de pràctiques que estarà a disposició dels estudiants que cursin el següent curs docent.

## 2. Objectius del projecte

Amb aquest projecte es proposa una finalitat docent, la creació d'un manual per a la realització d'una pràctica en l'assignatura d'aerodinàmica del màster d'automoció de l'ESEIB, tal com s'ha explicat anteriorment, i té com a objectiu principal realitzar, mitjançant CFD (*Computational Fluid Dynamics*), en concret, amb la versió estudiantil del programari ANSYS Workbench que es troba instal·lat als ordinadors de l'escola, l'estudi aerodinàmic d'un cotxe convencional centrant-se més en l'aerodinàmica de la part frontal del vehicle que en la del darrera tot variant l'angle d'inclinació del capó i creant diferents geometries per la seva part davantera.

A tal efecte, es pretén trobar la millor manera de realitzar el mallat i fer la simulació a partir d'un prototip de vehicle creat mitjançant CAD per tal que els alumnes puguin disposar d'aquesta geometria i mallat, i puguin realitzar, a partir d'aquests arxius i només obrint-los amb l'ANSYS Workbench, les pertinents simulacions així com analitzar els resultats i fer les diferents representacions que es demanaran a la pràctica.

Un altre objectiu que s'ha marcat també, ha sigut el de mostrar la diferència entre l'aerodinàmica d'un vehicle convencional i la d'un vehicle esportiu, veure com varia el flux al voltant de cadascun d'ells així com els coeficients aerodinàmics i les distribucions de pressions i velocitats i destacar la importància d'un bon disseny en la geometria del vehicle. Concretament, s'ha escollit una geometria de vehicle real per a la creació del model de vehicle esportiu, essent l'escollit el Chevrolet Camaro SS del 2015.

### 3. Introducció a l'aerodinàmica

A l'hora de dissenyar qualsevol vehicle, l'aerodinàmica juga un paper cada cop més important en l'àmbit de l'automoció.

L'aerodinàmica és la part de la mecànica de fluids que s'encarrega d'estudiar els fenòmens que s'originen quan existeix un moviment relatiu entre un sòlid i el fluid gasós que l'envolta (aire), determinant les pressions i forces que es generen.

Un dels aspectes més importants avui en dia a l'hora de comprar un cotxe és la seva línia, el seu disseny exterior. Encara que l'aerodinàmica és un dels factors que contribueix a donar un aspecte més o menys atractiu al cotxe, aquest no és, ni molt menys, el seu objectiu.

Al circular, el vehicle interacciona amb l'aire i això provoca l'aparició de dos tipus de flux que condicionen els efectes aerodinàmics: el flux extern, que es deu al pas de l'aire per la superfície exterior del cotxe, i el flux intern, degut a l'aire que passa pel seu interior (ja sigui pel motor o per l'habitacle dels ocupants).

El flux extern origina tres tipus de forces sobre un cotxe: la força de resistència a l'avanç (en sentit longitudinal), que s'oposa a l'avanç del vehicle a través de l'aire; la força de sustentació (en sentit vertical), en els cotxes convencionals es tracta d'una força vertical cap amunt, però també pot ser *downforce* (cap a baix) en el cas dels cotxes esportius, estrenyent el vehicle contra el terra; i la força lateral, deguda al vent lateral.

En els turismes, l'objectiu principal d'una empresa automobilística és la reducció de la resistència a l'avanç per motius de consum i emissions, però en furgonetes i vehicles similars, els enginyers es centren més en el comportament del vehicle davant el vent lateral, mentre que en vehicles de competició, aconseguir sustentació negativa és la màxima prioritat. Per tant, cap de les tres components de la força aerodinàmica total que actua sobre un vehicle és secundària.



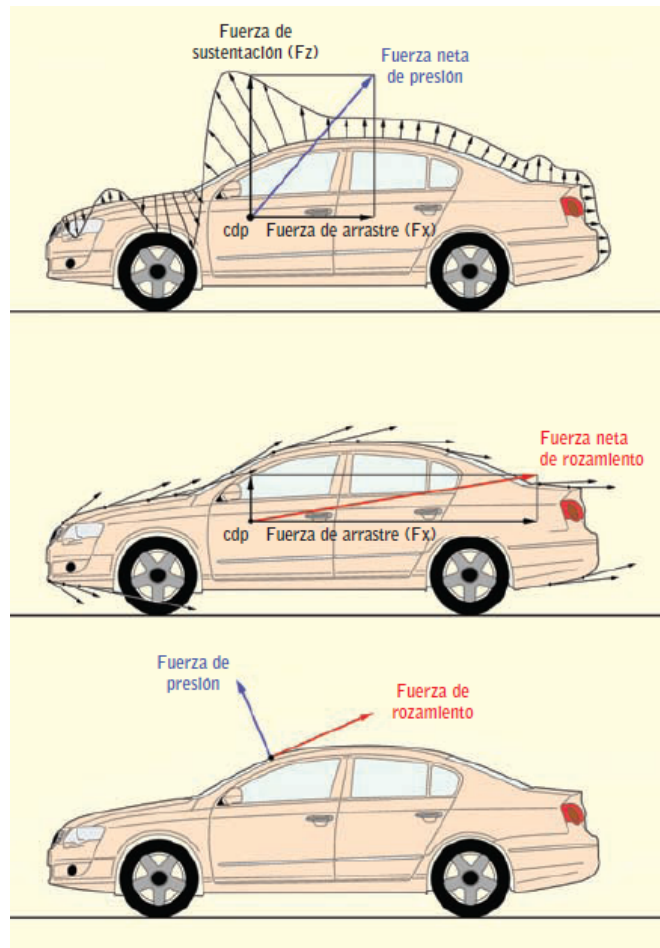


Figura 1: Comportament aerodinàmic d'un cotxe [7]

Donada la complexitat dels efectes de l'aire sobre el vehicle i amb la finalitat de facilitar el seu estudi, es fa dependre dites relacions dels anomenats coeficients aerodinàmics. Aquests coeficients són adimensionals i permeten deduir els efectes aerodinàmics sobre un determinat cos (prototip) a partir del model conegut.

Els coeficients més utilitzats en el cas de l'aerodinàmica d'un vehicle són: el coeficient de resistència a l'avanç ( $c_D$ ) i el coeficient de sustentació ( $c_L$ ) que es determinen per una simple divisió entre les forces corresponents, força de resistència a l'avanç ( $F_D$ ) o força de sustentació ( $F_L$ ), i el producte de la pressió dinàmica per una superfície de referència. Valors tots ells coneguts en l'entorn controlat.

El flux extern té, així mateix, un important impacte en l'estabilitat del vehicle, principalment a altes velocitats. D'aquesta manera el disseny aerodinàmic ha d'aconseguir un flux extern adequat per evitar l'excessiva acumulació de la brutícia existent en l'aire sobre les superfícies del vehicle, el que afecta considerablement a la visibilitat.

Els fenòmens com el despreniment de la capa límit provoquen excitacions a freqüències audibles i ser una font de soroll, que s'ha d'evitar també amb un disseny apropiat de les superfícies del cotxe.

D'altra banda, el flux intern també contribueix als esforços aerodinàmics. Un vehicle necessita tenir un flux intern per tal de refrigerar el motor i renovar l'aire de l'interior de l'habitacle.

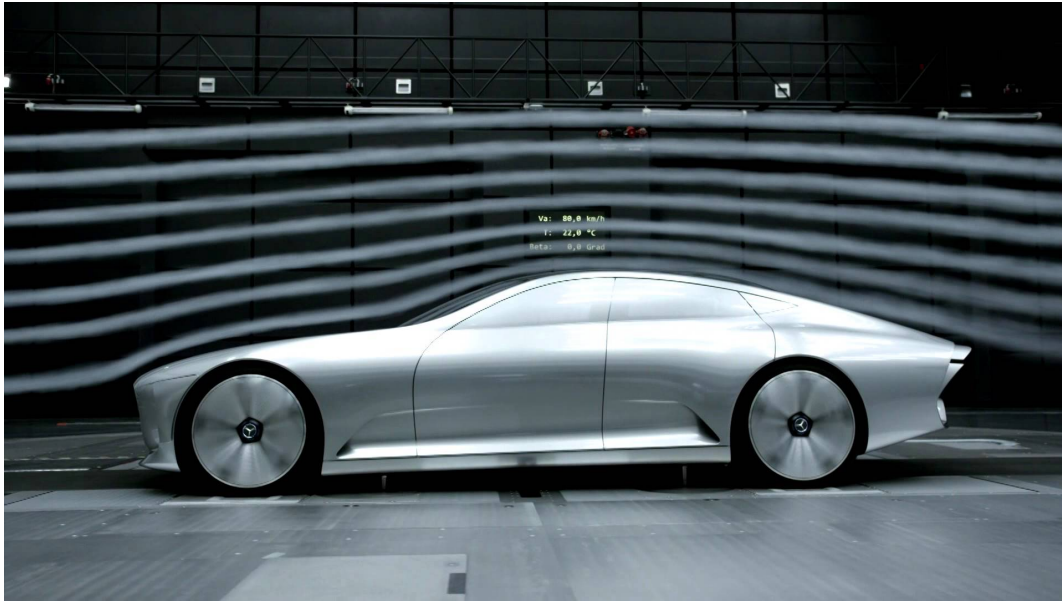
Històricament, l'aerodinàmica dels automòbils s'ha anat desenvolupant amb l'objectiu de reduir la resistència a l'avanç del vehicle. En els cotxes de competició, només a finals dels anys 60 es va apreciar un interès creixent per la component vertical de la força aerodinàmica (la sustentació) amb la finalitat de buscar per primera vegada el *downforce* en els vehicles. Aquesta tendència, va anar passant poc a poc a la resta d'automòbils, el que es fa palès en diferents elements quotidians en els vehicles d'avui dia com poden ser els *spoilers*.

Per altra banda, les dues crisis del petroli en la dècada dels 70 van forçar als fabricants a fixar-se encara més en l'aerodinàmica i tractar d'optimitzar els seus vehicles per tal de reduir la resistència a l'avanç i, per tant, el seu consum de combustible. S'ha de remarcar que els requisits aerodinàmics depenen, en gran mesura, del tipus de vehicle que s'estigui considerant.

Abans de començar l'estudi detallat dels diferents elements que intervenen en el disseny aerodinàmic d'un automòbil, s'ha de mencionar la relació que existeix entre l'automoció i el camp de l'aeronàutica (avions i vaixells).

És important notar la diferència que hi ha entre l'enfocament tècnic en l'àmbit de l'automoció i l'aeronàutica. En aeronàutica, el paper del càlcul per ordinador en el disseny aerodinàmic de l'avió és més important que en l'automòbil, camp en el que habitualment es recorre, en gran mesura, als assajos empírics. En el disseny de vehicles, no s'utilitzen models teòrics precisos que prediguin les forces aerodinàmiques, de manera que la majoria de resultats i conclusions s'obtenen mitjançant proves amb el propi model d'automòbil.

L'estudi de tots aquests efectes que produeix el moviment de l'aire al voltant d'un vehicle es realitza en túnels de vent, on es simulen les condicions que experimentarà el vehicle d'estudi en una situació real.

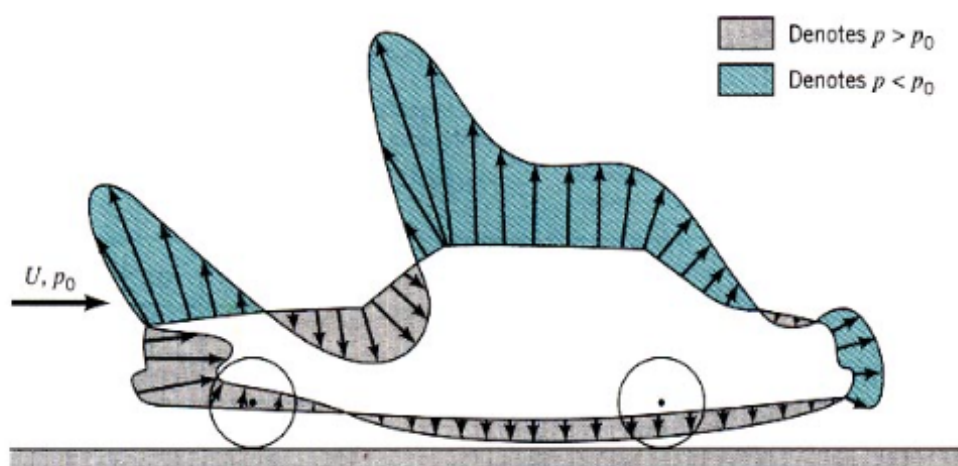


*Figura 2: Representació d'un túnel de vent [10]*

## 4. Resistència a l'avanc

En el disseny de la geometria del cotxe és important tenir en compte que quant menor sigui la força de resistència a l'avanc, menor serà el consum del cotxe.

Els cossos que tinguin formes que minimitzin les pressions positives a la part del davant del vehicle i minimitzin les pressions negatives a la part del darrera seran els que obtindran una mínima resistència a l'avanc.



*Figura 3: Distribució de pressions en un cotxe convencional [10]*

Per altra banda, un bon disseny de la part del darrera d'un vehicle només és efectiu si el flux a la part frontal es troba enganxat a aquesta, per tant, s'ha d'aconseguir retardar o evitar el desprendiment de la capa límit en aquesta zona.

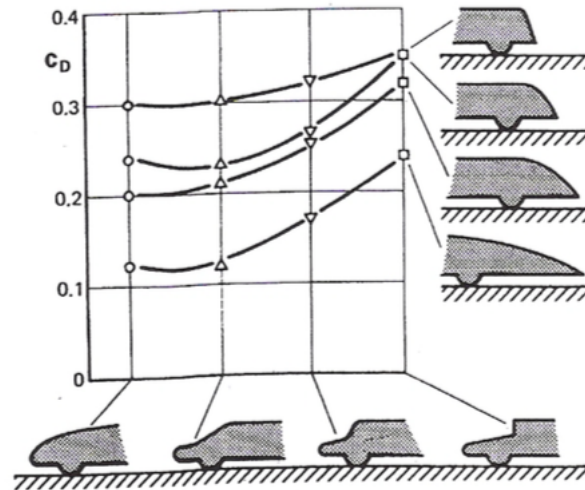


Figura 4: Valor del  $C_D$  en funció del disseny frontal i del darrera del vehicle [1]

Per tal de controlar el despreniment de la capa límit en la part davantera del vehicle, s'han de tenir en compte la influència dels següents elements:

- **Formes angulars:** s'han d'evitar i aconseguir que totes les vores estiguin arrodonides amb una petita curvatura per tal que el corrent d'aire flueixi sense provocar turbulències.
- **Angle d'inclinació del parabrises:** un augment d'aquest fa reduir la força de resistència a l'avanç notablement encara que a partir dels  $60^\circ$  ja no millora més i comencen a aparèixer problemes de visibilitat, escalfament excessiu de l'habitacle, etc.

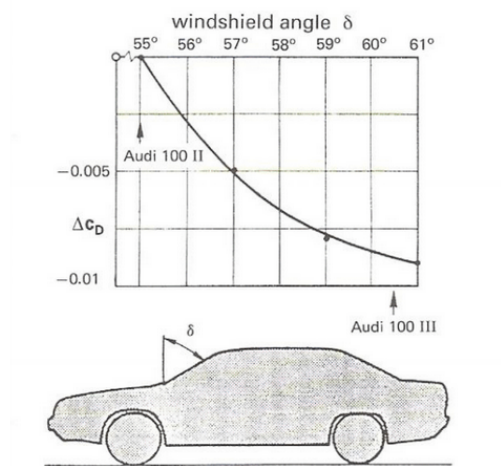


Figura 5: Variació del  $C_D$  segons l'angle d'inclinació del parabrises [1]

- **Angle d'inclinació del capó:** un augment d'aquest també fa que la resistència a l'avanç disminueixi, encara que hi ha un angle òptim a partir del qual aquesta no baixarà més.

Per assolir però, una baixa resistència a l'avanç, no és suficient amb evitar el despreniment del flux sinó que també és necessari que el punt d'estancament que apareix a la cara frontal del vehicle es trobi en la posició òptima. Donada la proximitat del baix del cotxe amb el terra, l'aire tendeix a fluir més per sobre i al voltant del vehicle que per sota d'ell. El punt d'estancament determina quina part del flux passa per la part superior del vehicle i quina passa per la part de sota. En general, una posició baixa del punt d'estancament afavoreix una baixa resistència a l'avanç.

Pel que fa al sostre del vehicle, aquests estan dissenyats en forma convexa per assegurar la rigidesa. Per raons estètiques, s'intenta que la convexitat sigui el més petita possible. Si la convexitat s'incrementa, el coeficient de resistència a l'avanç pot reduir-se.

D'altra banda, s'ha d'assegurar que amb l'arqueig del sostre l'àrea frontal del vehicle quedi aproximadament constant, si no el coeficient absolut del *drag* ( $C_d \cdot A$ ) augmenta de forma considerable, encara que el valor del  $C_d$  disminueixi.

La reducció de la resistència a l'avanç amb l'increment de curvatura del sostre és degut a dos fenòmens:

- Permet augmentar el radi de transició entre parabrises i sostre, amb el que es redueix el pic de depressió creat en aquest punt. Amb això, el gradient de pressions advers serà menor i dificulta el despreniment de la capa límit.
- La deflexió de les línies de corrent en la part posterior del vehicle, mantenint el flux enganxat a la superfície, permet augmentar lleugerament la pressió a la part del darrera.

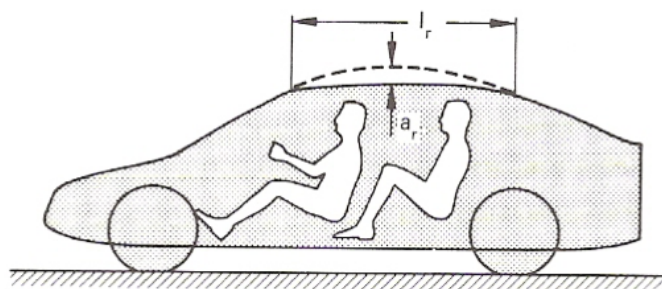
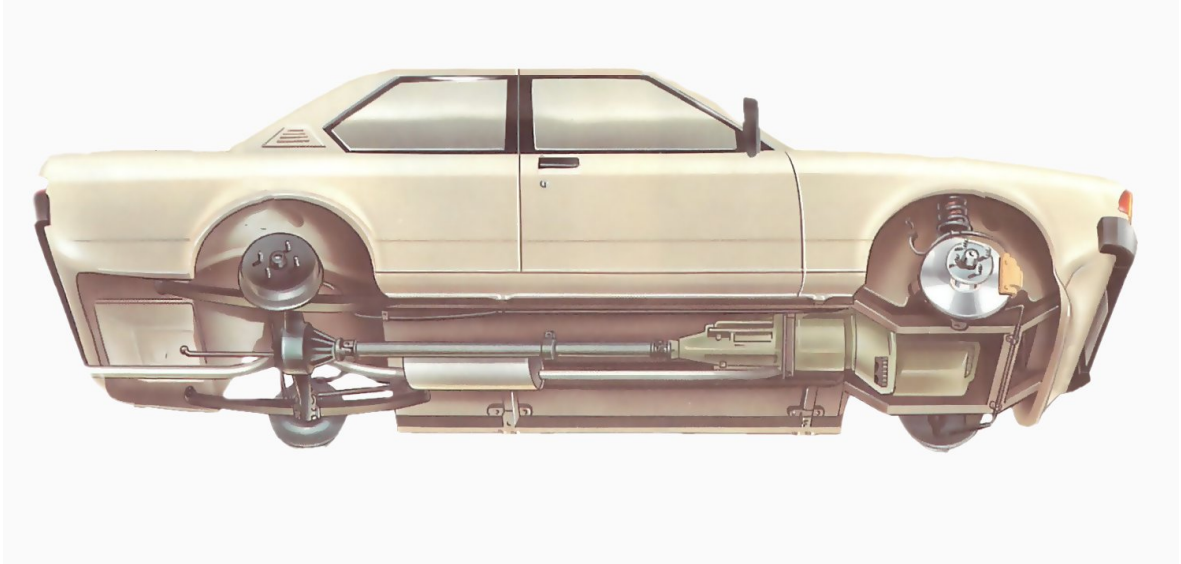


Figura 6: Representació de la convexitat del sostre d'un vehicle [1]

Finalment, la part inferior del vehicle també juga un paper important en quant a la resistència a l'avanç. La part inferior de la majoria dels vehicles s'assembla a una superfície molt rugosa degut als components situats en aquesta zona. Una part baixa sense rugositats pot millorar molt la resistència a l'avanç però és complicada de fer. És per aquest motiu que en cotxes de competició s'utilitza un fons pla per tal de reduir la resistència a l'avanç tot el que es pugui.



*Figura 7: Part inferior d'un vehicle [10]*



## 5. Primer model: prototip cotxe convencional

### 5.1. Geometria

S'ha dissenyat una primera geometria amb totes les superfícies del cotxe llises exceptuant el fons d'aquest que s'ha fet rugós per tal de simular els components que es troben a la part inferior d'un cotxe.

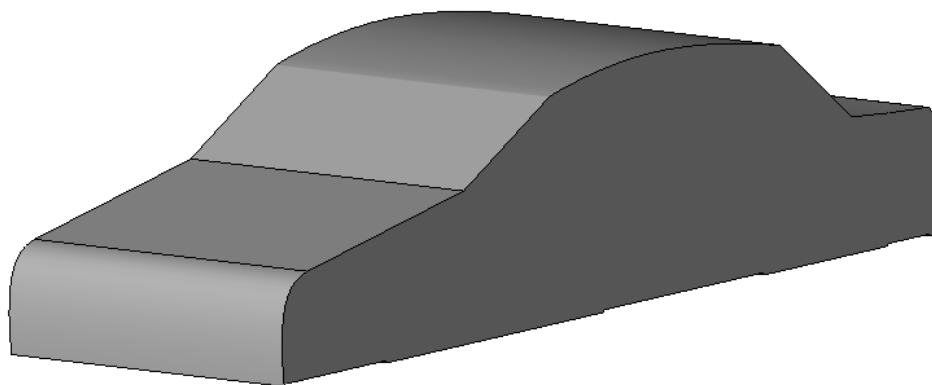
S'ha establert una inclinació del parabrises de  $60^\circ$  ja que amb una inclinació superior a aquesta, no s'aconsegueix reduir més la força de resistència a l'avanç com s'ha vist anteriorment. A més, totes les vores de les superfícies que conformen el cotxe han sigut arrodonides per tal que l'aire quedi enganxat i dificultar el despreniment de la capa límit.

Totes les geometries complexes que hauria de travessar el de flux com ara els mànecs de les portes, els retrovisors, la graella de para-xocs, etc. no han estat considerats. Així com tampoc s'han considerat les rodes per la complexitat del flux que les envolta, la dificultat a l'hora d'estudiar-les ja que s'han de definir com parets rotatives i el punt de tangència de la roda amb el terra que dona problemes a l'hora de realitzar les simulacions.

Degut a que la finalitat del projecte és de caire docent, no es busca tant la proximitat dels resultats a la realitat sinó la manera òptima de realitzar les simulacions i interpretar els resultats obtinguts.

A més, degut a la simetria del vehicle, s'ha procedit a fer l'estudi de la meitat del cotxe podent així realitzar un millor mallat i obtenint resultats més precisos.

Seguidament es veu representat el model creat així com les seves mesures en metres:



*Figura 8: Geometria del prototip de cotxe convencional creada mitjançant CAD [Font pròpia]*



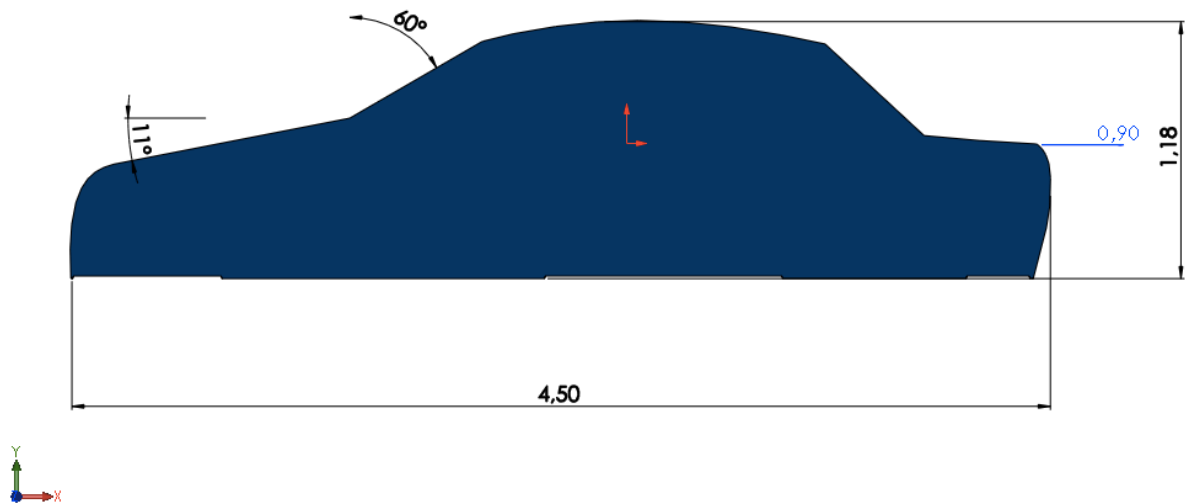


Figura 9: Geometria del prototip de cotxe convencional acotada [Font pròpia]

Un cop dissenyada la geometria, s'ha creat el volum de control on s'estudiarà el comportament aerodinàmic del vehicle amb unes dimensions que permetin captar l'efecte de les turbulències en el vehicle així com el deixant que es forma a la part del darrera.

Les dimensions del volum de control són les següents:

|          |         |
|----------|---------|
| Altura   | 5,9 m   |
| Llargada | 29,25 m |
| Amplada  | 4,72 m  |

A continuació es mostra el volum de control que s'ha utilitzat per la realització del mallat i la simulació:

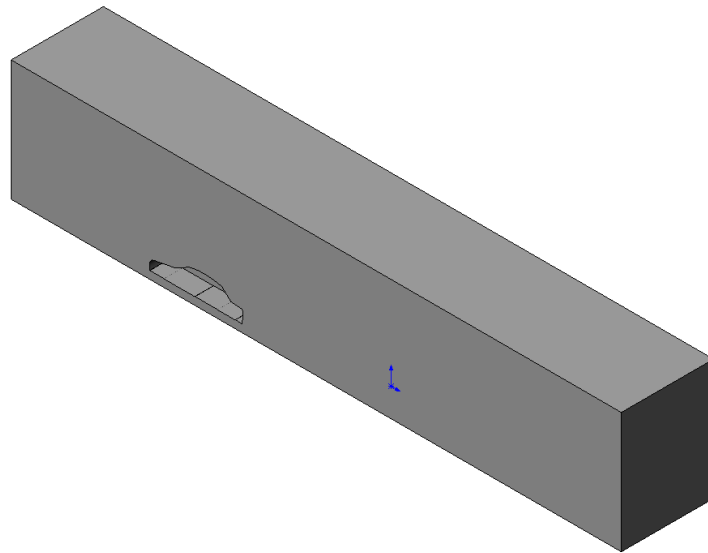


Figura 10: Volum de control utilitzat pel prototip de cotxe convencional [Font pròpia]

## 5.2. Condicions de contorn

Per tal de poder realitzar la simulació i obtenir resultats, s'han definit les entrades i sortides de flux així com la resta de superfícies on s'aplicaran les condicions de contorn mitjançant l'opció *create named selection*:

- Entrada = *velocity-inlet*
- Sortida = *pressure-outlet*
- Parets superior, inferior i costat oposat al cos = *symmetry-top*, *road* i *symmetry-side* respectivament.
- Paret on es troba el cos = *symmetry*
- Totes les parets del cos = *body*

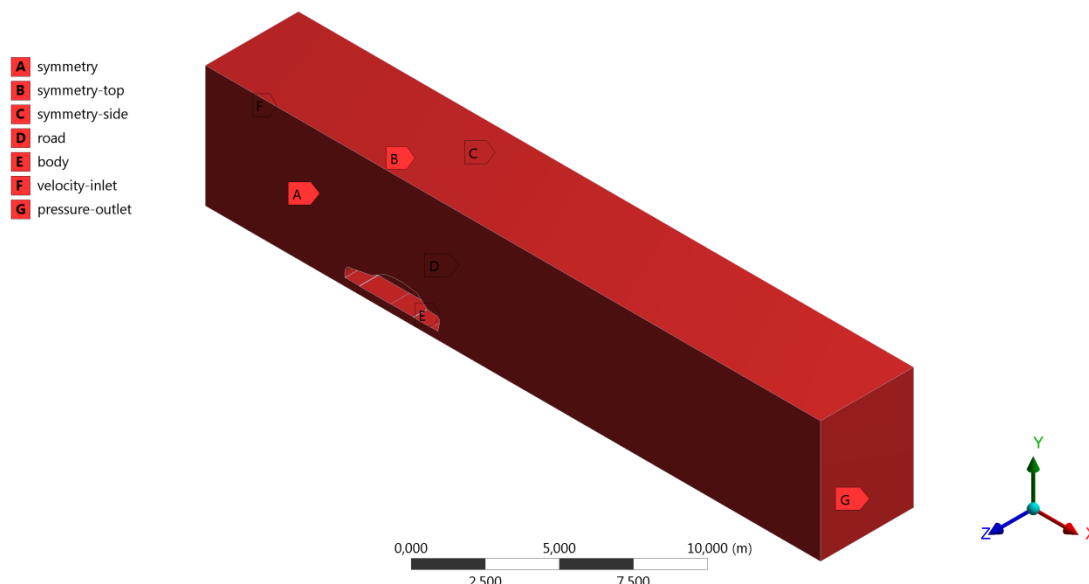


Figura 11: Condicions de contorn aplicades al volum de control [Font pròpia]

Seguidament, s'ha procedit a establir les diferents condicions de contorn seguint les recomanacions d'ANSYS:

- Per tal de poder realitzar la simulació, s'ha triat una velocitat de 30 m/s ( $\approx 108$  km/h) inferior a la velocitat límit permesa en el país per la DGT i suficientment gran com per aconseguir que es generin forces aerodinàmiques considerables. D'aquesta manera, s'ha definit la magnitud i direcció del flux per l'entrada *velocity-inlet*. A més, com que és una zona de flux lliure on no hi ha moltes perturbacions en l'aire, s'ha aplicat una turbulència de l'1 %.
- Seguidament s'ha definit una pressió relativa de 0 Pa per la sortida del flux *pressure-outlet* ja que tot l'estudi es realitza a pressió atmosfèrica. En aquest cas, ja que el fluid ha passat per zones amb turbulències ocasionades pel vehicle, s'ha aplicat una turbulència del 5 %.
- Finalment, s'ha imposat la condició de lliscament (*moving wall*) a la part inferior del vehicle *road* ja que és una superfície on l'efecte viscos no és negligible i que es mou a la mateixa velocitat que el fluid d'entrada.
- El contorn del vehicle *body* roman immòbil i la resta de superfícies s'han considerat simetries ja que estan suficientment allunyades com perquè els efectes viscosos no influeixin en els resultats de la simulació.

### 5.3. Mallat i resultats obtinguts

Un cop preparada la geometria, s'han aplicat les condicions de contorn i s'ha procedit a la seva discretització mitjançant una malla on, per cada volum finit, es resoldran les equacions de Navier-Stokes.

La exactitud dels resultats depèn de la qualitat d'aquesta malla. Segons la complexitat de la malla, és necessari l'ús de més o menys elements per poder seguir-la representant amb exactitud. Ara bé, la quantitat d'elements que poden ser utilitzats al mallat està limitada per la versió estudiantil d'ANSYS així com pels recursos de l'ordinador utilitzat, essent el màxim d'elements de 512.000.

Pel que fa a la geometria dels elements del mallat, els quadrats serien una bona solució a l'hora de mallar si el programa fos capaç d'alinear-los i ordenar-los correctament al perfil i de forma automàtica. Això no és així, de manera que s'ha escollit l'opció del mallat triangular que permet que aquests s'adaptin millor a la geometria i aporta una major densitat de nodes en determinades zones.

Amb l'objectiu d'obtenir els resultats que més s'aproximin a la realitat, s'ha procedit a fer un estudi de sensibilitat de la malla per tal d'obtenir aquella que fos l'òptima i assegurés els resultats més precisos possibles. Per cada malla utilitzada s'han fet els càlculs de pressions, velocitats, coeficient de resistència a l'avanç i coeficient de sustentació per tal de veure com varien aquests segons com sigui el mallat de la geometria i decidir quina malla és la millor. Aquest estudi de sensibilitat ha constatat de 4 etapes.

Un cop preparat el model a estudiar, s'ha procedit a la utilització del paquet Fluent per tal d'obtenir els resultats aerodinàmics. S'ha escollit la manera de resoldre les equacions i quines simplificacions es poden fer. En aquest cas, es pot eliminar l'equació de l'energia ja que el flux és incompressible, d'aquesta manera s'han calculat només les equacions de continuïtat, quantitat de moviment i les equacions del model de turbulència utilitzat i que s'explica a continuació.

Existeixen diversos tipus de models que simulen la turbulència. Per aquest projecte, s'ha escollit el model k-èpsilon ja que és el millor en quant estabilitat dels resultats i requereix un baix cost computacional, a més que és el més comú per simular condicions de flux extern turbulent. Es tracta d'un model amb dues equacions de transport (PDEs) que dona una descripció general de la turbulència:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{l\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

- La primera variable de transport determina l'energia present en la turbulència i s'anomena energia cinètica turbulenta ( $k$ ).
- La segona variable de transport és la dissipació turbulenta ( $\epsilon$ ) i determina el rati de dissipació de l'energia cinètica turbulenta.

Amb això ja es pot començar a solucionar el model. La solució consta de dues parts, resoldre les equacions de primer ordre i, seguidament, les de segon ordre. S'han fet servir 1.000 iteracions per tal d'assegurar que els residuals dels diferents factors (continuitat, velocitats,  $k$  i  $\epsilon$ ) siguin més petits que  $10^{-3}$  i, per tant, que la solució hagi convergit.

Les iteracions i temps emprats fins que la solució convergeix, varien segons el nombre d'elements utilitzat en cada mallat i la capacitat de memòria de l'ordinador utilitzat.

### 5.3.1. Primer mallat

Primerament, s'ha realitzat el mallat per defecte d'ANSYS obtenint un total de 44.938 nodes i 243.358 elements.

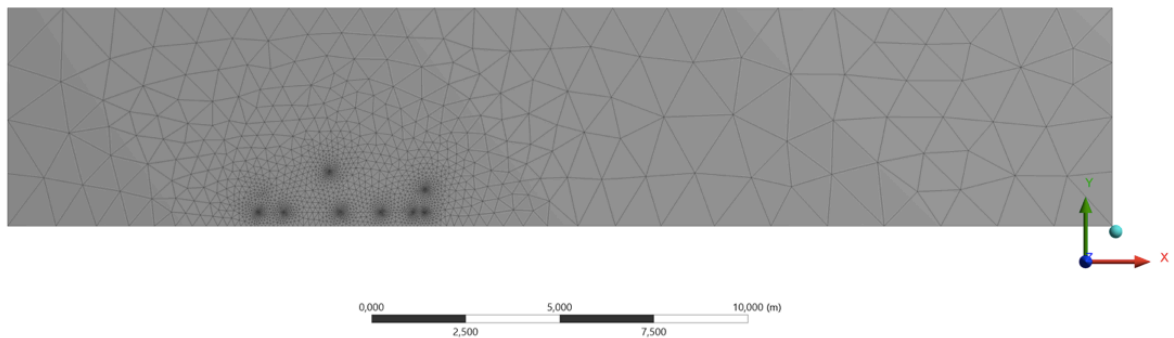


Figura 12: Primer mallat del volum de control del prototip de cotxe convencional [Font pròpia]

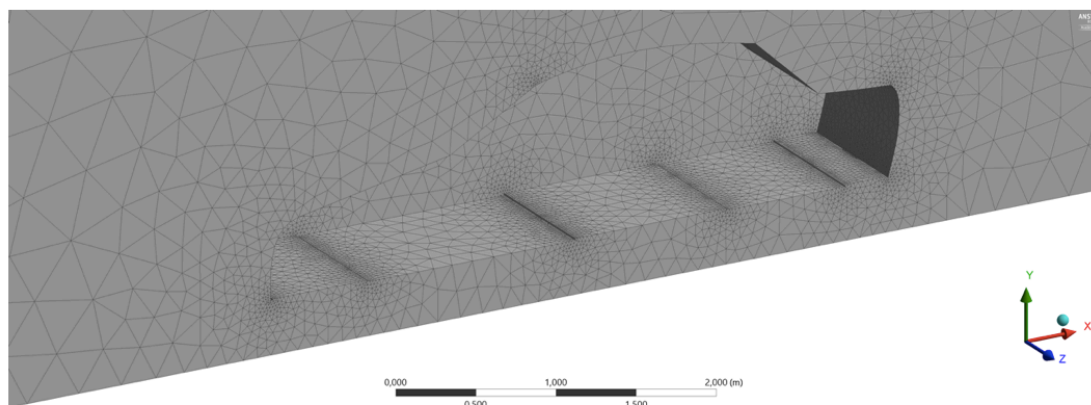


Figura 13: Detall del primer mallat [Font pròpia]

Seguidament, per tal de comprovar si la malla és adequada per poder realitzar les simulacions i obtenir resultats precisos i fiables, s'han utilitzat dos paràmetres diferents que mesuren la qualitat de la malla: la relació d'aspecte (*aspect ratio*) i la asimetria (*skewness*).

El rati d'aspecte és la relació entre el costat més llarg i el més curt d'una cel·la. Idealment, aquest hauria de ser igual a 1 per assegurar els millors resultats. A més, les variacions locals en la mida de la cel·la han de ser mínimes, és a dir, les mides de les cel·les adjacents no han de variar en més d'un 20 %. Tenir una relació d'aspecte gran pot donar com a resultat un error d'interpolació de magnitud inacceptable.

En el següent gràfic es veu representat aquest paràmetre per la malla en qüestió:

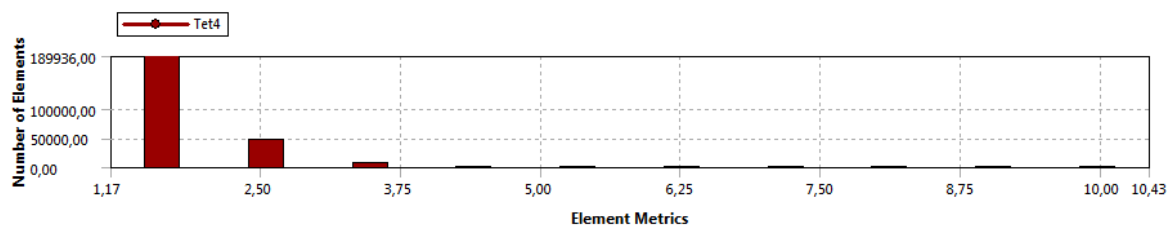


Figura 14: Representació de l'aspect ratio del primer mallat [Font pròpia]

Es pot observar com la majoria dels elements es troben dins del rang 1,5 – 2,5 de rati d'aspecte, podent considerar la qualitat d'aquesta primera malla acceptable.

Per altra banda, el paràmetre asimetria també és una de les principals mesures de la qualitat d'una malla ja que determina la proximitat a la idealitat d'una cara o d'una cel·la. D'acord amb la definició d'aquest paràmetre, un valor proper a 0 indica una cel·la amb tots els costats iguals (equilateral) mentre que un valor proper a 1 indica una cel·la completament degenerada.

Per cel·les quadrilàteres com triangulars, la asimetria ha de ser inferior a 0,85 per tal que el programa pugui solucionar el mallar i que les simulacions no divergeixin obtenint així resultats fiables i precisos.

En el següent gràfic es mostra com és aquest paràmetre per a la malla tractada:

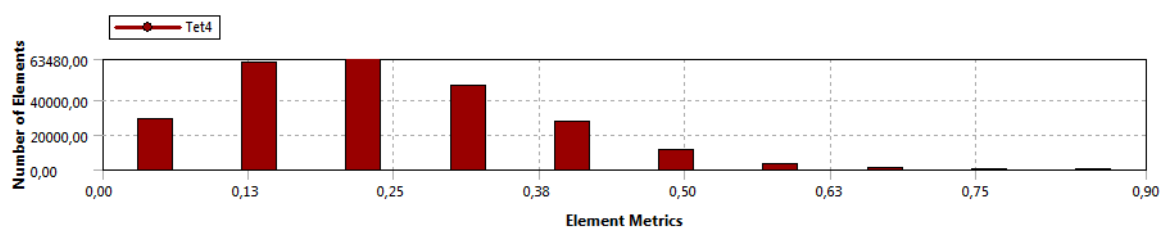


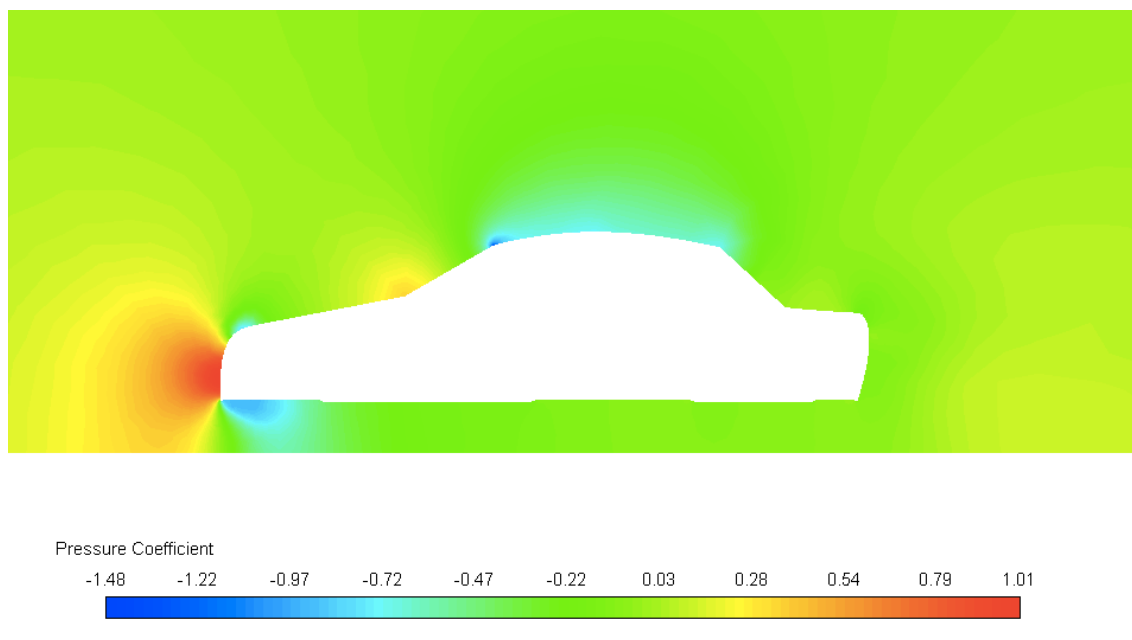
Figura 15: Representació de l'skewness del primer mallat [Font pròpia]

Es pot observar com la majoria dels elements es troben dins del rang d'un valor d'asimetria de 0,13 – 0,3 inferior a 0,85 i podent considerar el mallat apte per a la realització de les simulacions.

Un cop finalitzat el mallat, s'ha procedit a fer la simulació per tal d'obtenir els resultats de pressions, velocitats i paràmetres aerodinàmics quan l'aire flueix al voltant del vehicle.

#### 5.3.1.1. Camp de pressions

Un cop realitzat el primer mallat i feta la simulació, s'ha procedit a l'obtenció del camp de pressions, representat pel coeficient de pressió, gràcies al qual es pot intuir quin tipus de forces rebrà el cotxe i quines parts seran les que més patiran:



*Figura 16: Distribució de pressions del primer mallat [Font pròpia]*

Les zones vermelles corresponen a les parts del vehicle on la pressió és més elevada ( $c_p = 1$ ) mentre que les zones blaves corresponen a les parts del vehicle on la pressió és més baixa ( $c_p = -1,4$ ), inclús negativa, indicant que la pressió en aquella zona és menor que l'atmosfèrica.

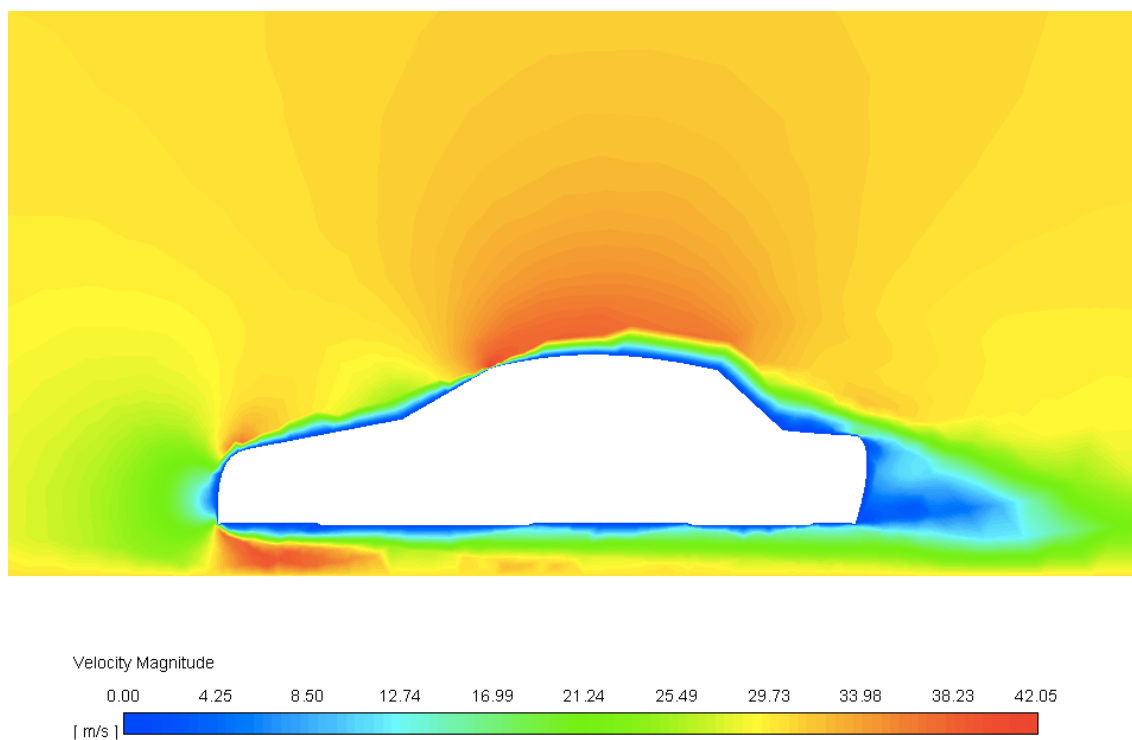
D'aquesta manera, es pot observar que les parts del vehicle que estan sotmeses a una pressió major són la part davantera i la part baixa del parabrises. En aquestes zones, l'aire impacta i perd tota la seva velocitat fent augmentar la pressió, per tant, a la part frontal del vehicle apareix un punt d'estancament (on la velocitat és nul·la) ja que una part de l'aire, després de l'impacte, marxa per sobre del vehicle mentre que l'altra part ho fa per sota.

D'altra banda, les zones que estan sotmeses a una depressió més forta són aquelles on l'aire pateix canvis de trajectòria bruscos, perquè hi circula a més velocitat. Aquestes són: la cantonada superior i inferior de la part davantera del vehicle, la cantonada superior del parabrises i tota la part del sostre. Són les depressions les causants de la generació de *lift* al vehicle.



### 5.3.1.2. Camp de velocitats

Seguidament, s'ha representat el camp de velocitats pel model en estudi:



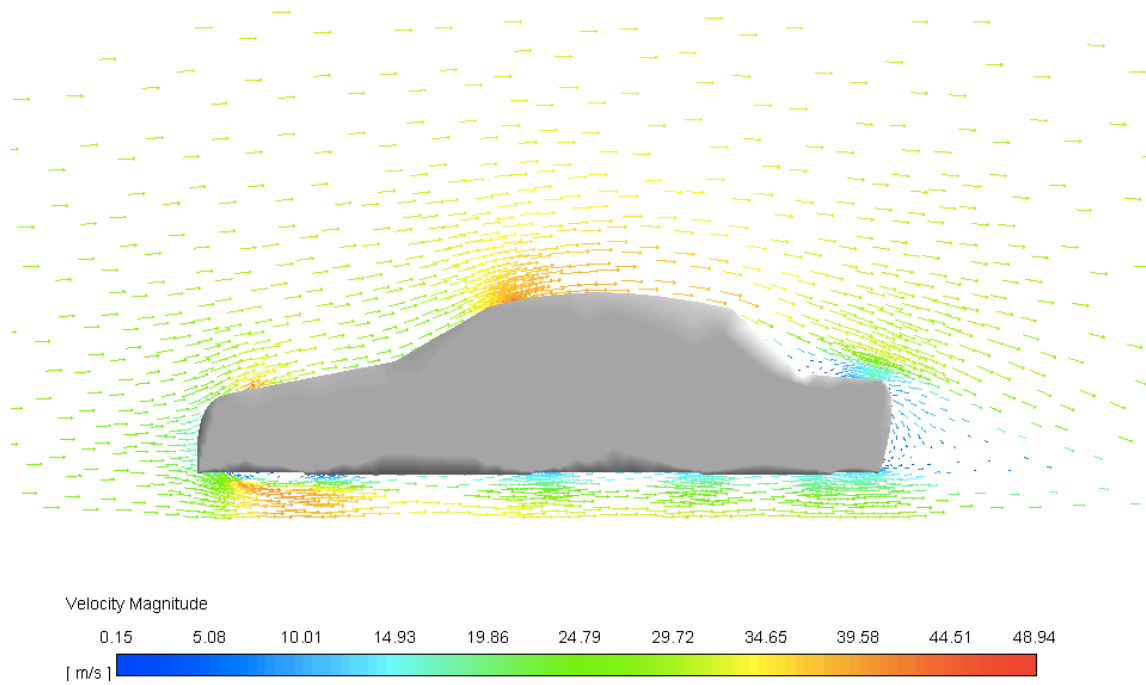
*Figura 17: Camp de velocitats del primer mallat [Font pròpia]*

A diferència del camp de pressions, aquí es fa servir la velocitat relativa per tal d'obtenir resultats de manera intuïtiva. Anàlogament al cas anterior, però observant ara les velocitats, les zones marcades en vermell indiquen una major velocitat mentre que les zones blaves indiquen una velocitat baixa en aquella part del vehicle.

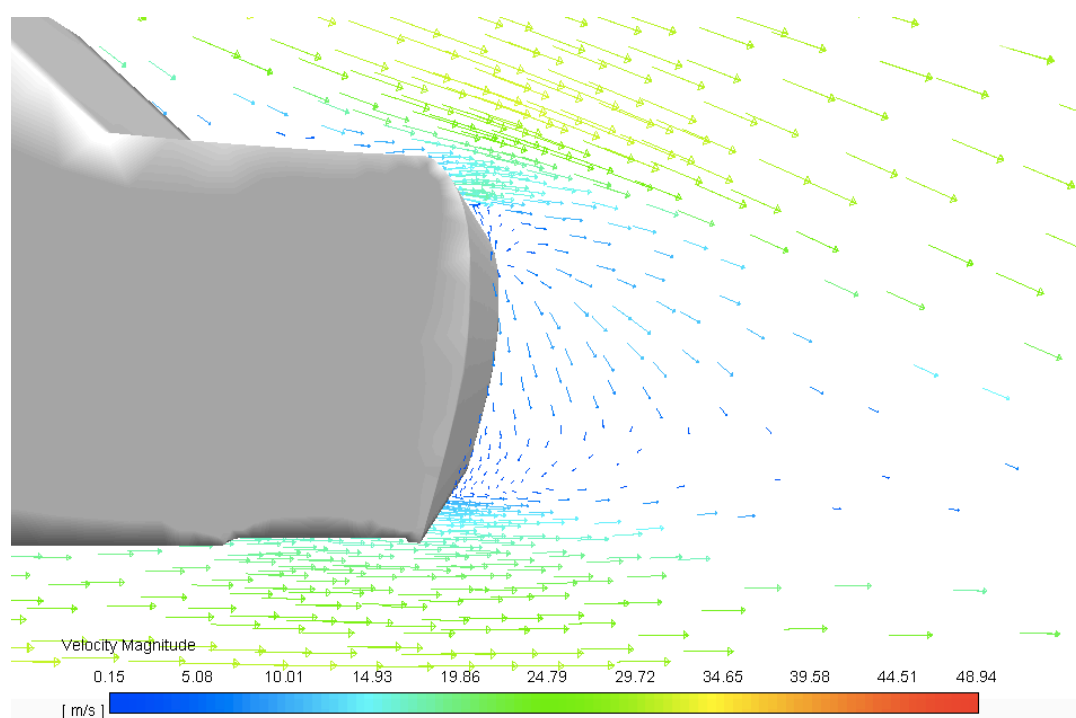
Degut a la qualitat d'aquesta primera malla creada, sembla com si el flux es despregués del vehicle a cada canvi de geometria i no queden ben definides les zones d'alta i baixa velocitat, encara que es pot intuir que, a les zones on s'ha vist anteriorment que la pressió era elevada, la velocitat de l'aire a través d'aquestes serà pràcticament nul·la i viceversa.

A més, es pot apreciar el deixant a la part del darrera del cotxe i fer-se una idea de les seves dimensions.

Per tal de poder observar amb més detall com incideix el flux d'aire sobre el volum del vehicle, s'han representat els vectors velocitat al voltant d'aquest:



*Figura 18: Vectors velocitat del primer mallat [Font pròpia]*



*Figura 19: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del primer mallat [Font pròpia]*

Aquests gràfics permeten analitzar, en major profunditat, quina és la forma d'aquest deixant i com són els remolins que es formen degut al despreniment de la capa límit.

De la mateixa manera que anteriorment, aquesta primera malla poc precisa no permet veure en detall el comportament del flux ni els remolins que s'originen, longitudinalment, en dues parts diferenciades del vehicle: la part del darrera (maleter) i la part davantera (para-xocs).

### 5.3.1.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics

Els resultats obtinguts dels paràmetres aerodinàmics un cop ha convergit la solució i s'ha observat que es mantenen constants són els següents:

|       |       |
|-------|-------|
| $c_L$ | 0,336 |
| $c_D$ | 0,432 |

Finalment, s'ha procedit a la representació de les línies de corrent que tenen lloc al voltant del vehicle.

Les línies de corrent mostren el lloc geomètric dels punts tangents al vector velocitat de les partícules d'aire en un instant de temps determinat, podent veure així com varia la velocitat en les diferents parts del vehicle.

Igual que anteriorment, les diferents tonalitats de colors representen les velocitats a la que circula l'aire per les diferents parts del vehicle.

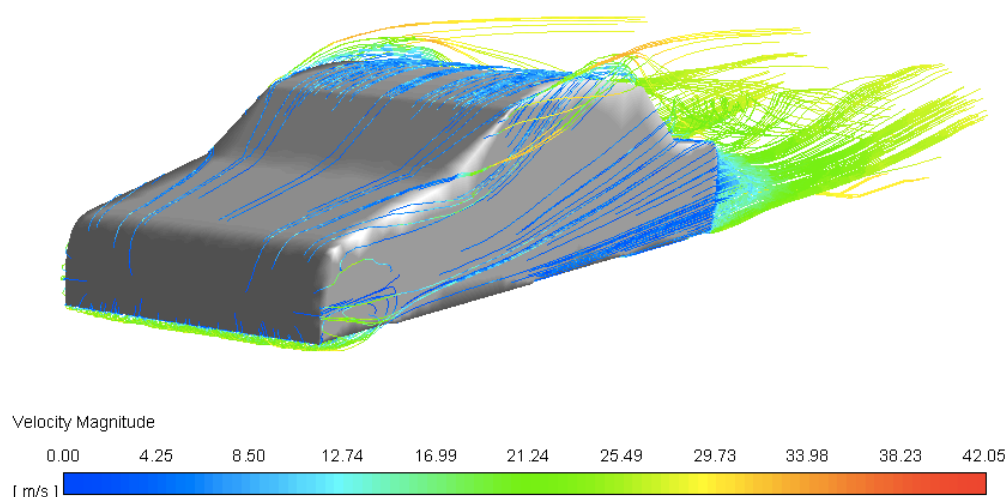
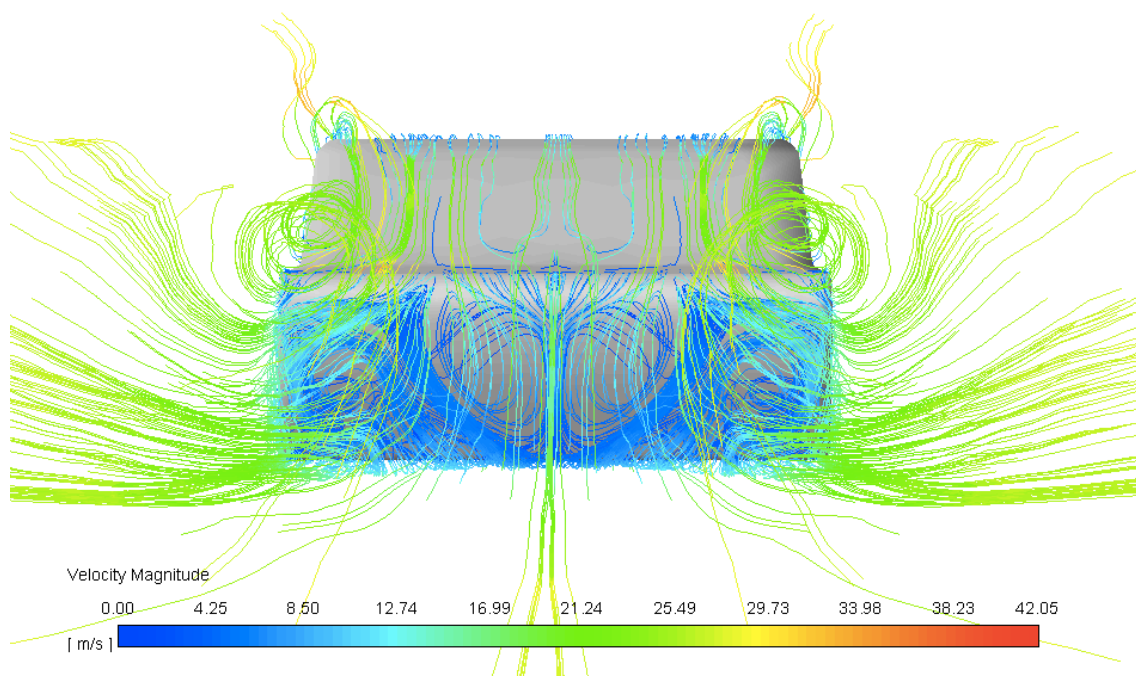


Figura 20: Línies de corrent del primer mallat [Font pròpia]



*Figura 21: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del primer mallat [Font pròpia]*

Degut a aquesta primera malla utilitzada, pràcticament resulta impossible diferenciar l'aparició dels remolins tant a la part del darrera del vehicle com a la zona del parabrises.

### 5.3.2. Segon mallat

Com s'ha pogut observar anteriorment en el primer mallat, la malla és bastant basta i no contempla la capa límit al voltant del vehicle. Al mateix temps, el mallat del volum de control pot ser més bast que el de la superfície del cotxe aprofitant així els elements sobrants per refinar tota la part del cos (*body*) del cotxe ja que és l'objecte principal a estudi i interessen obtenir resultats òptims entorn aquest.

Un cop clars els aspectes a millorar, s'ha procedit a la creació de la nova malla. Aquesta vegada, no s'ha realitzat el mallat predeterminat d'ANSYS sinó que s'ha optimitzat manualment a partir de diverses operacions:

- **Mallat del volum de control:** s'ha realitzat un mallat amb una mida d'element de 0,6 m per tot el volum de control.

- **Mallat de les superfícies del vehicle:** s'ha realitzat un mallat amb una mida d'element de 0,1 m per totes les superfícies del vehicle.
- **Refinat de la part inferior del vehicle:** s'ha procedit a refinar la part inferior del vehicle amb una mida d'element de 0,04 m per tal que s'implementés correctament la capa límit en aquesta zona.
- **Definició de la capa límit:** s'ha definit la capa límit al voltant del vehicle amb l'opció *inflation >> total thickness* amb un total de 7 capes, un rati de creixement del 20 % i un gruix màxim de 0,1 m.

El nombre total de nodes i elements utilitzats per aquest segon mallat ha sigut de 102.124 i 371.948 respectivament.

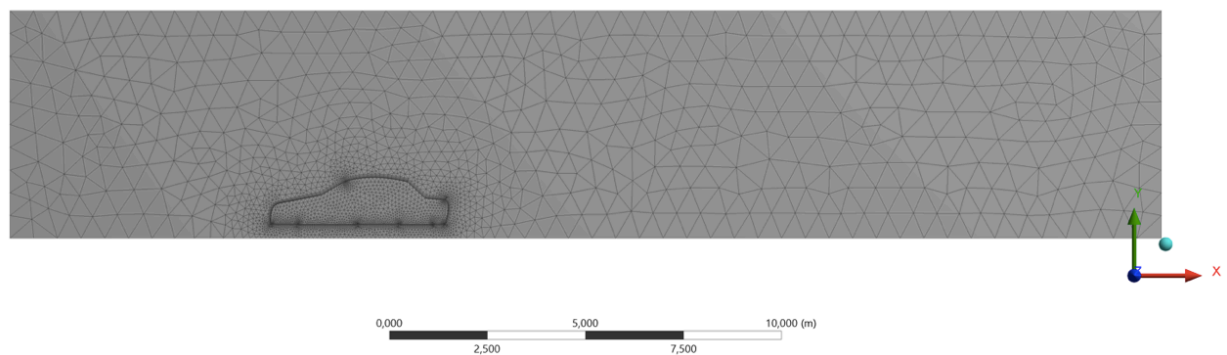


Figura 22: Segon mallat del volum de control del prototip de cotxe convencional [Font pròpia]

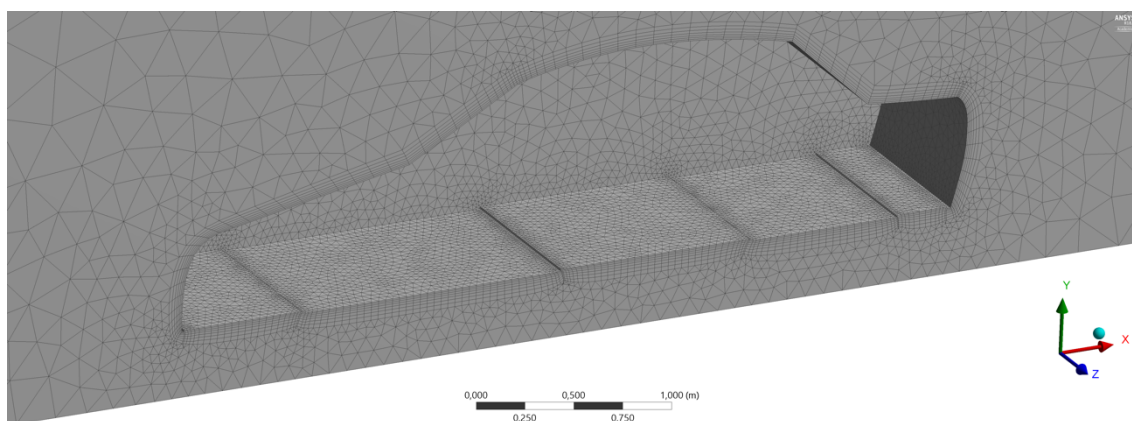


Figura 23: Detall del segon mallat [Font pròpia]

Anàlogament al mallat anterior, s'ha procedit a comprovar la qualitat de la nova malla, utilitzant els paràmetres *aspect ratio* i *skewness*.

En els següents gràfics es mostra com són aquests paràmetres:

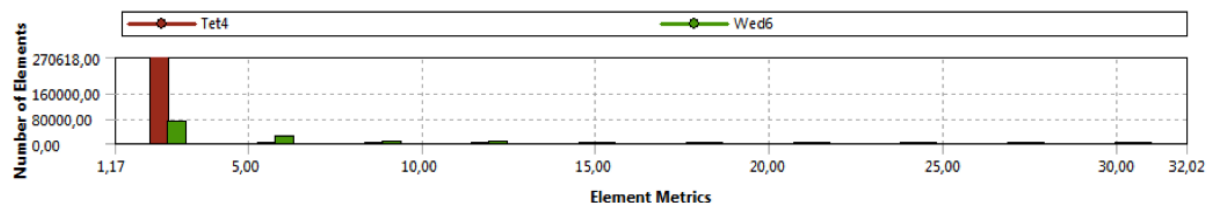


Figura 24: Representació de l'aspect ratio del segon mallat [Font pròpia]

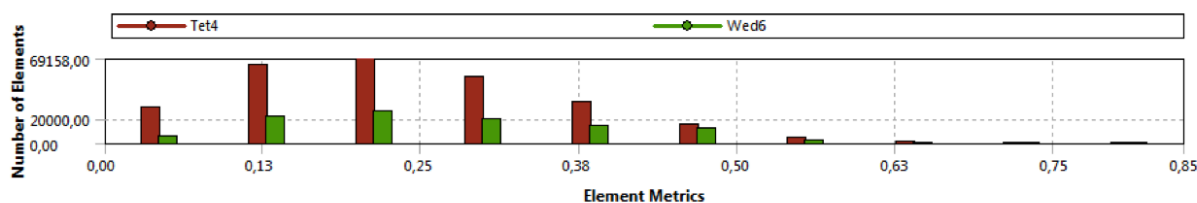


Figura 25: Representació de l'skewness del segon mallat [Font pròpia]

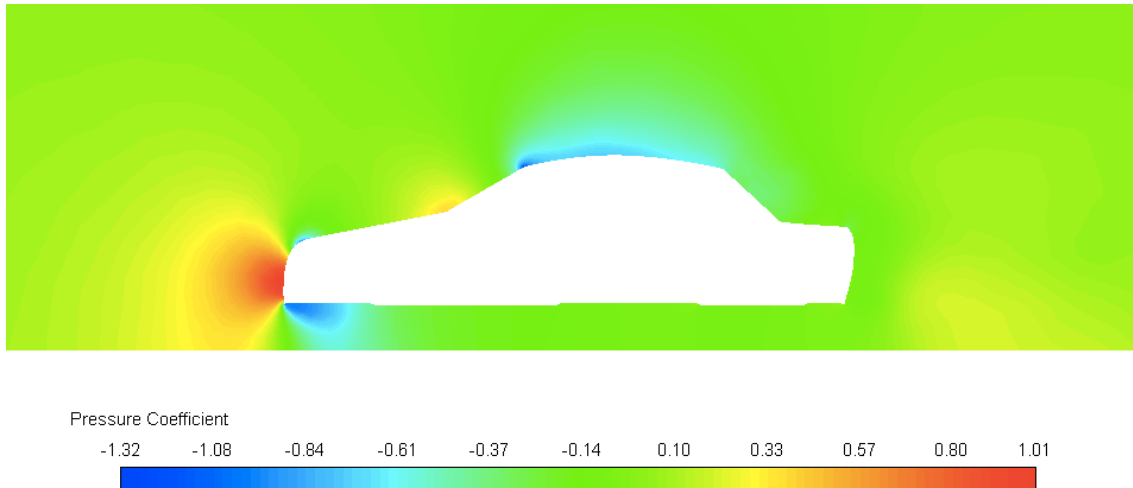
És important remarcar que, tant per aquest nou mallat com pels que s'han fet posteriorment, els elements utilitzats són tetraedres exceptuant la capa límit, que ANSYS per defecte utilitza hexaedres.

Pel que fa a l'*aspect ratio*, es pot observar com ara pràcticament tots els elements es troben al voltant del valor 1,5 essent aquesta malla d'una qualitat millor que l'anterior.

D'altra banda, similar al cas anterior, la majoria d'elements es troben amb un valor del paràmetre *skewness* pròxim a 0,3 podent considerar la malla apta per a les simulacions.

### 5.3.2.1. Camp de pressions

A continuació es mostra el camp de pressions representat amb el coeficient de pressió:

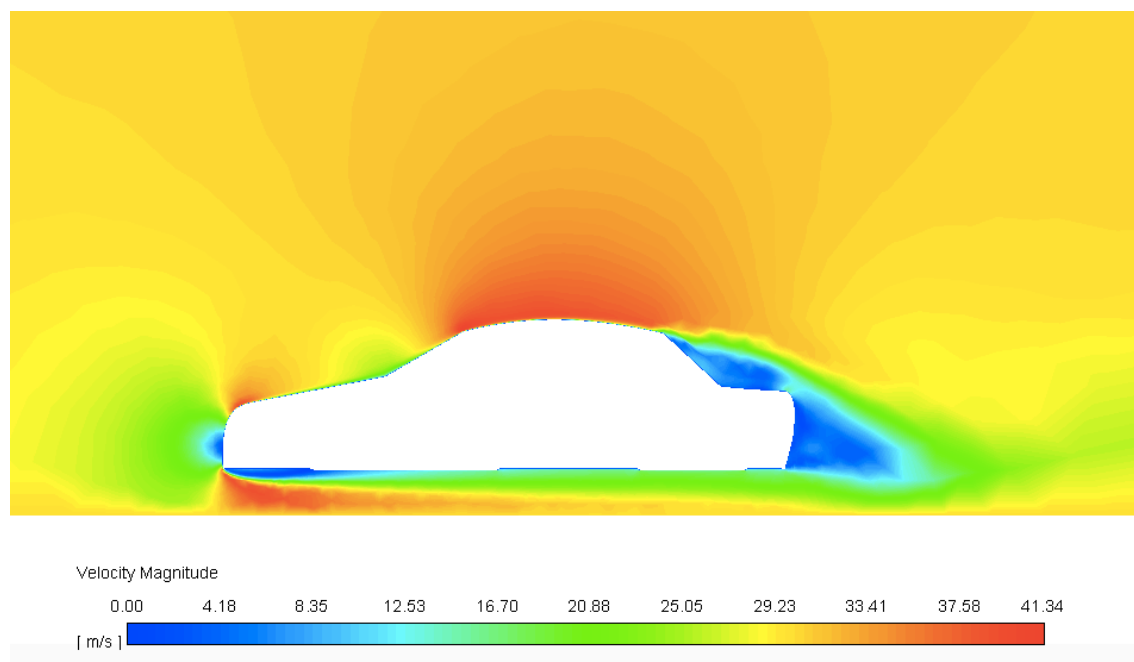


*Figura 26: Distribució de pressions del segon mallat [Font pròpia]*

Amb aquesta simulació es pot observar com la pressió mínima que pateix el vehicle (en valor absolut) és una mica inferior a la trobada amb la malla anterior però que les zones d'alta i baixa pressió són les mateixes.

### 5.3.2.2. Camp de velocitats

Seguidament, està representat el camp de velocitats pel model en estudi:



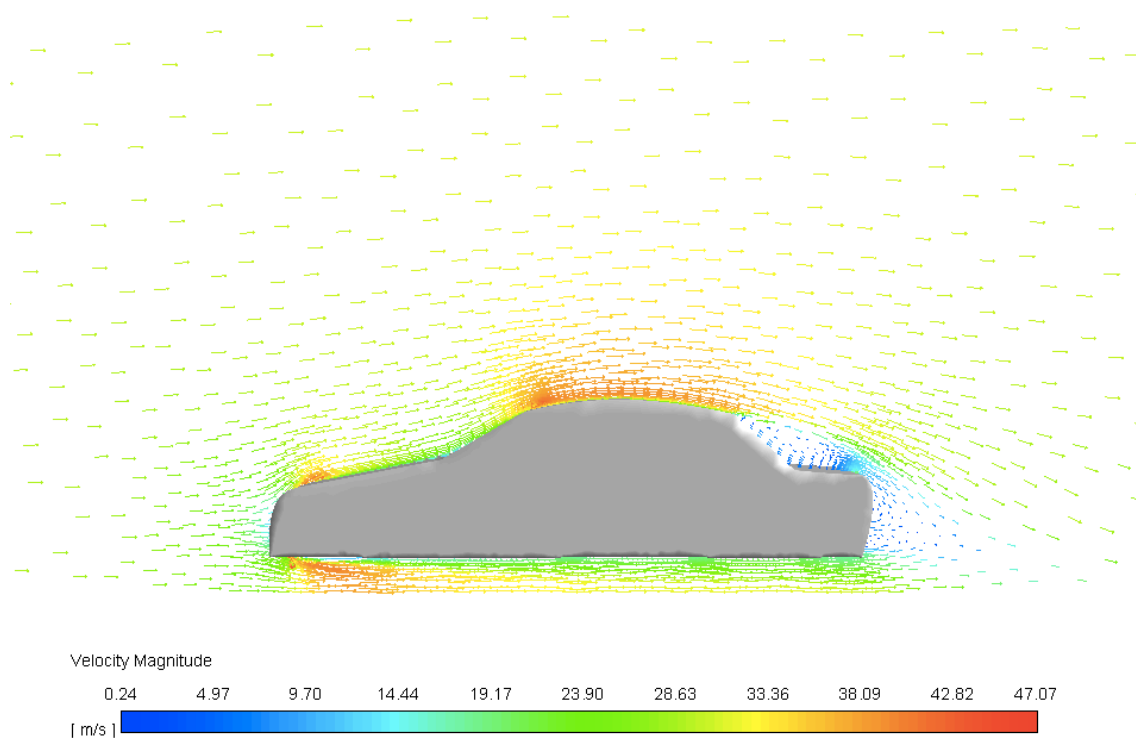
*Figura 27: Camp de velocitats del segon mallat [Font pròpia]*

Gràcies a aquest segon mallat, s'observa que la capa límit es desprèn al final del sostre així com quan l'aire entra per la part de sota del vehicle. Encara que en aquest punt es desprèn, l'aire es torna a enganxar i flueix a través de la part de sota del cotxe.

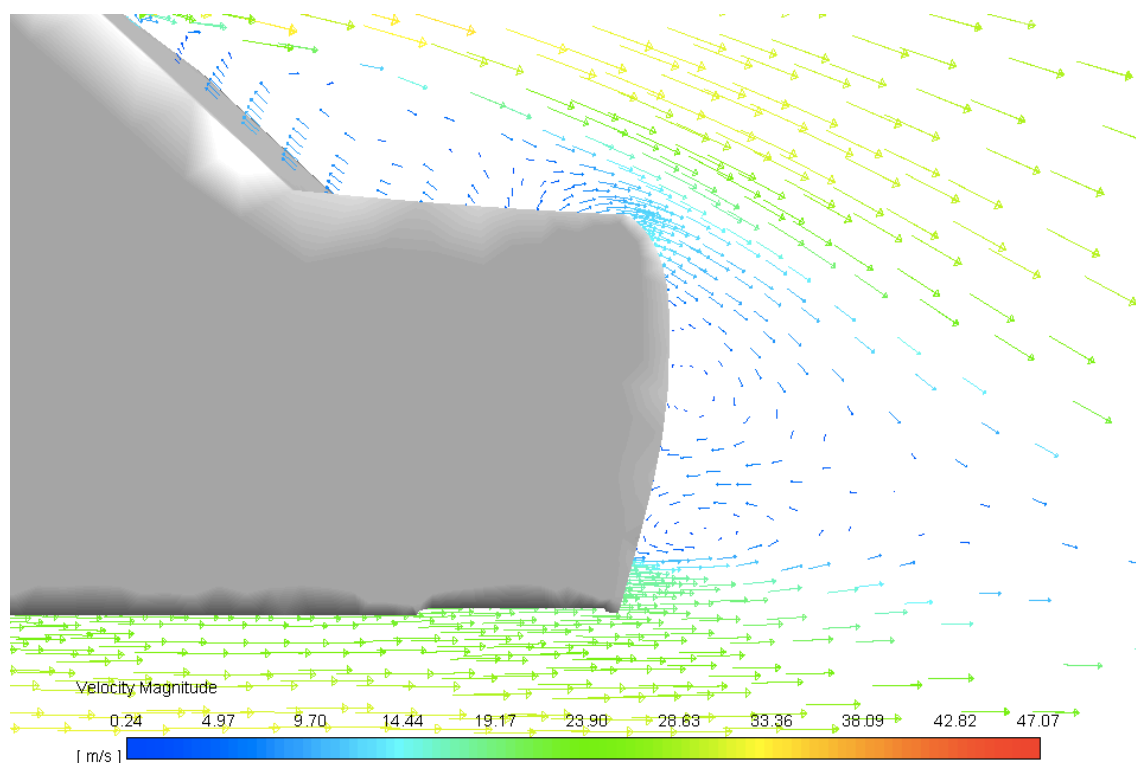
Al mateix temps, les zones d'alta i baixa velocitat estan millor definides que en el cas anterior on la malla utilitzada era més basta.

Anàlogament al cas anterior, s'han representat els vectors velocitat al voltant del vehicle:





*Figura 28: Vectors velocitat del segon mallat [Font pròpia]*



*Figura 29: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del segon mallat [Font pròpia]*

Es pot observar ara l'aparició de dos remolins a la zona del deixant tal i com s'havia esmentat anteriorment però que amb el primer mallat no podien ser captats.

### 5.3.2.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics

Els resultats obtinguts dels paràmetres aerodinàmics un cop ha convergit la solució i s'ha observat que es mantenen constants són els següents:

|       |       |
|-------|-------|
| $c_L$ | 0,368 |
| $c_D$ | 0,466 |

Es pot veure com els coeficients aerodinàmics difereixen dels de la malla anterior essent un 10 % superiors aproximadament. Això es deu a aquesta nova malla amb la que s'aconsegueixen uns resultats més precisos i més propers a la realitat.

Anàlogament al cas anterior, s'han representat les línies de corrent al voltant del vehicle:

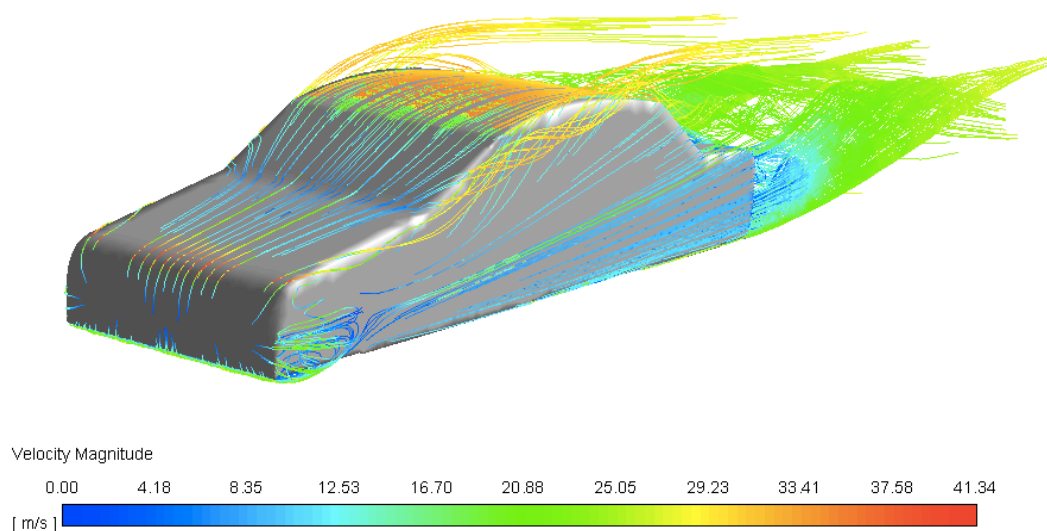
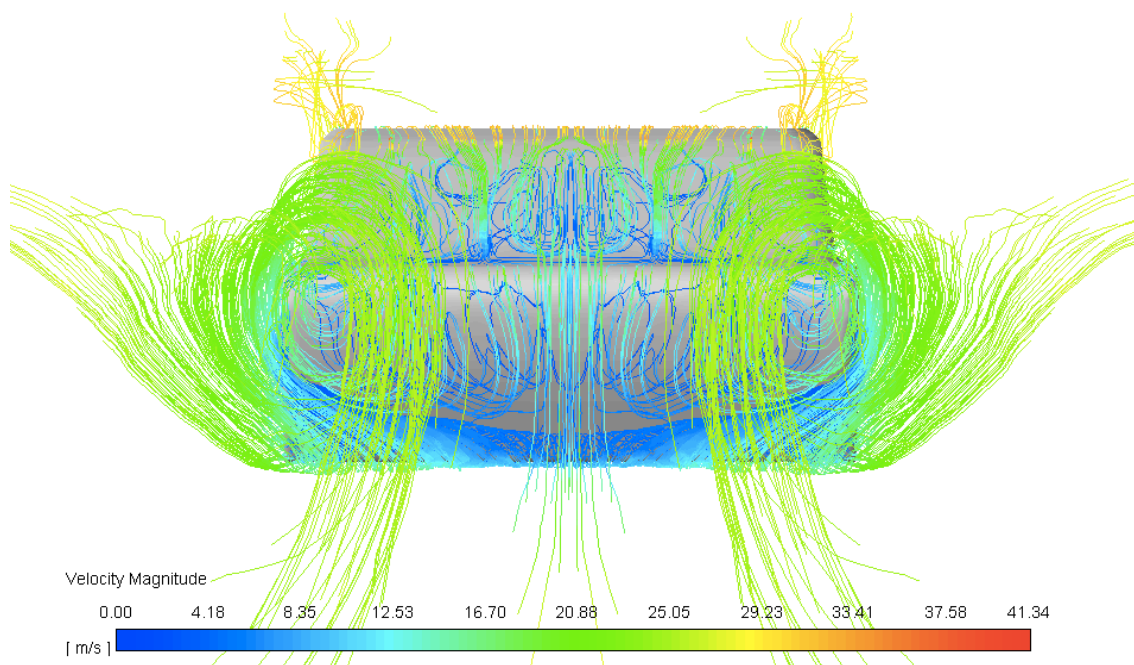


Figura 30: Línies de corrent del segon mallat [Font pròpia]



*Figura 31: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del segon mallat [Font pròpia]*

Amb aquest mallat, es poden apreciar millor els remolins formats a la part del darrera del vehicle encara que els remolins a la cantonada superior del parabrises continuen sent difícils d'observar.

### 5.3.3. Tercer mallat

En aquest últim mallat, s'han incorporat les millores que s'han cregut oportunes per tal d'aconseguir la malla òptima que proporcioni la major precisió en els resultats. Aquestes millores han sigut: la utilització d'un algoritme que proporciona una millor qualitat de la malla, el refinat de la zona que es troba entre el terra i la part inferior del vehicle i el refinat de la zona del darrera del vehicle.

A continuació es llisten les operacions realitzades per la creació d'aquest mallat amb més detall tot explicant la seva funcionalitat:

- **Patch conforming method:** s'ha aplicat aquest algoritme que utilitza tetraedres ja que, al tenir una geometria d'un cos sòlid ben hermètica, aquest mètode proporciona la millor qualitat de malla que es pot obtenir. Aquest mètode és una tècnica de mallat on totes les cares i els seus límits (vores i vèrtex) ['patches'] dins d'una tolerància molt petita són respectades.

- **Mallat del volum de control:** s'ha realitzat un mallat amb una mida d'element de 0,4 m per tot el volum de control.
- **Refinat del volum entre el terra i la part inferior del vehicle:** s'ha realitzat un refinat amb l'opció *body of influence* utilitzant una làmina molt prima creada amb SolidWorks per tal de guanyar precisió en els resultats corresponents al flux que travessa la part de sota del vehicle. La mida d'element usada per aquest refinat ha sigut de 0,05 m.
- **Refinat del volum a la part de darrera del vehicle:** s'ha realitzat un refinat amb l'opció *sphere of influence* utilitzant una esfera situada, segons uns eixos de coordenades, just a la part de darrera del cotxe amb la intenció de captar els remolins que es formen en la zona del deixant. La mida d'element usada per aquest refinat ha sigut també de 0,05 m per tal de tenir una malla el més homogènia possible.
- **Mallat de les superfícies del vehicle:** s'ha realitzat un mallat amb una mida d'element de 0,05 m per totes les superfícies del vehicle.
- **Definició de la capa límit:** s'ha definit la capa límit al voltant del vehicle amb l'opció *inflation >> total thickness* amb un total de 7 capes, un rati de creixement del 20 % i un gruix màxim de 0,1 m igual que en el cas anterior.

El nombre total de nodes i elements utilitzats per aquest mallat ha sigut de 129.088 i 505.053 respectivament.

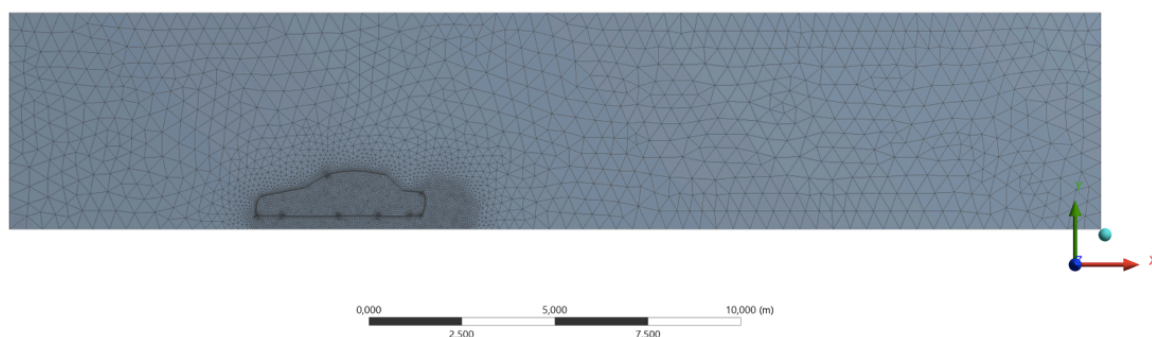


Figura 32: Tercer mallat del volum de control del prototip de cotxe convencional [Font pròpia]

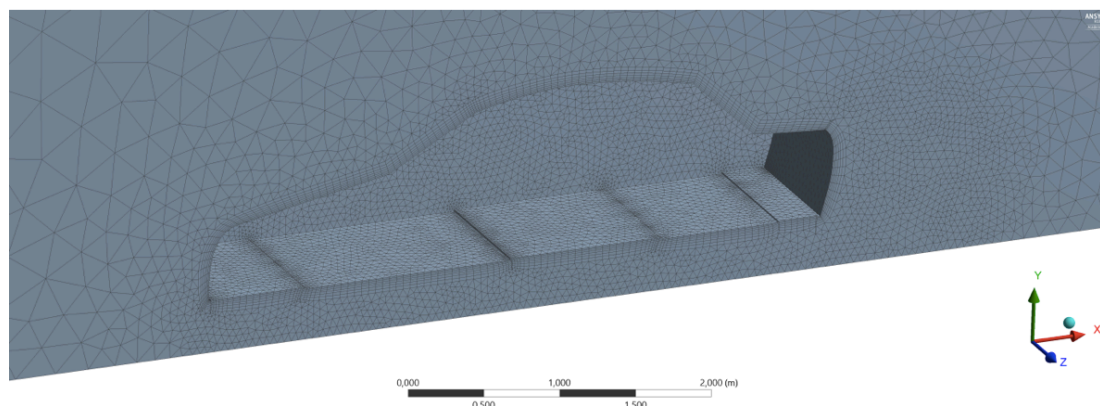


Figura 33: Detall del tercer mallat [Font pròpia]

Anàlogament als mallats realitzats anteriorment, s'ha procedit a comprovar la qualitat de la nova malla, utilitzant els paràmetres *aspect ratio* i *skewness*.

En els següents gràfics es mostra com són aquests paràmetres:

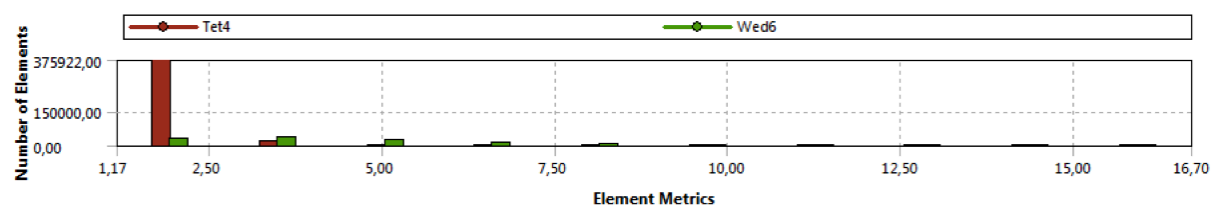


Figura 34: Representació de l'aspect ratio del tercer mallat [Font pròpia]

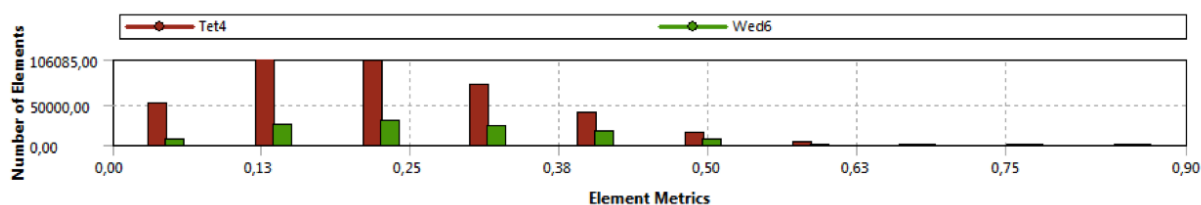


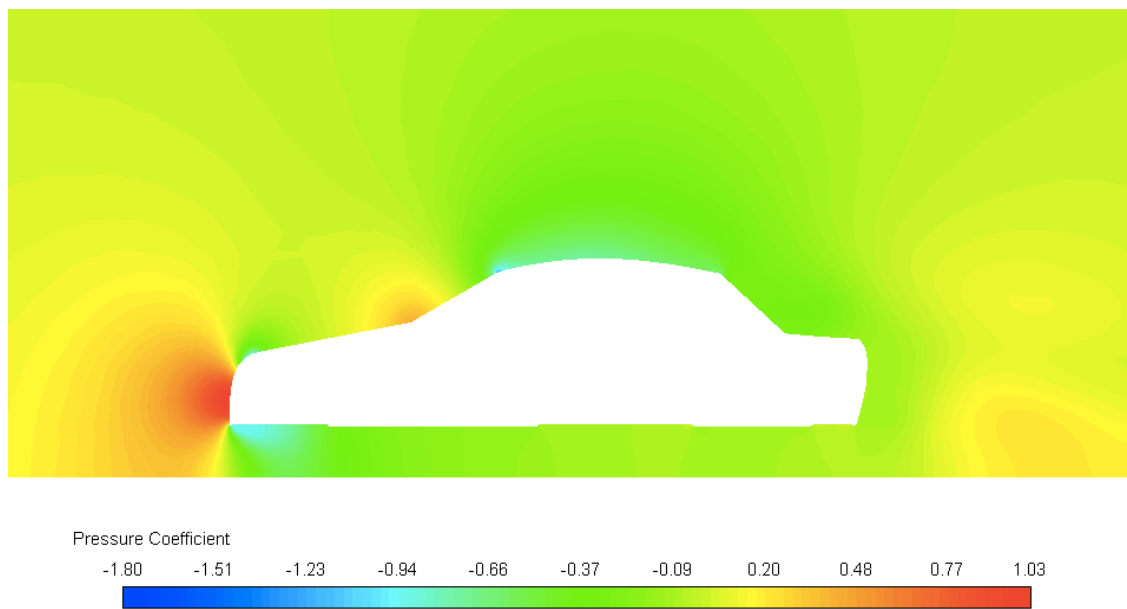
Figura 35: Representació de l'skewness del tercer mallat [Font pròpia]

Pel que fa a l'*aspect ratio*, es pot observar com ara el valor d'aquest paràmetre per tots els elements de la malla és més proper a la unitat, la qual cosa indica que aquesta malla té una millor qualitat que l'anterior.

D'altra banda, similar al cas anterior, la majoria d'elements es troben amb un valor del paràmetre *skewness* pròxim a 0,3 podent considerar la malla apta per a les simulacions.

### 5.3.3.1. Camp de pressions

A continuació es mostra el camp de pressions representat amb el coeficient de pressió:



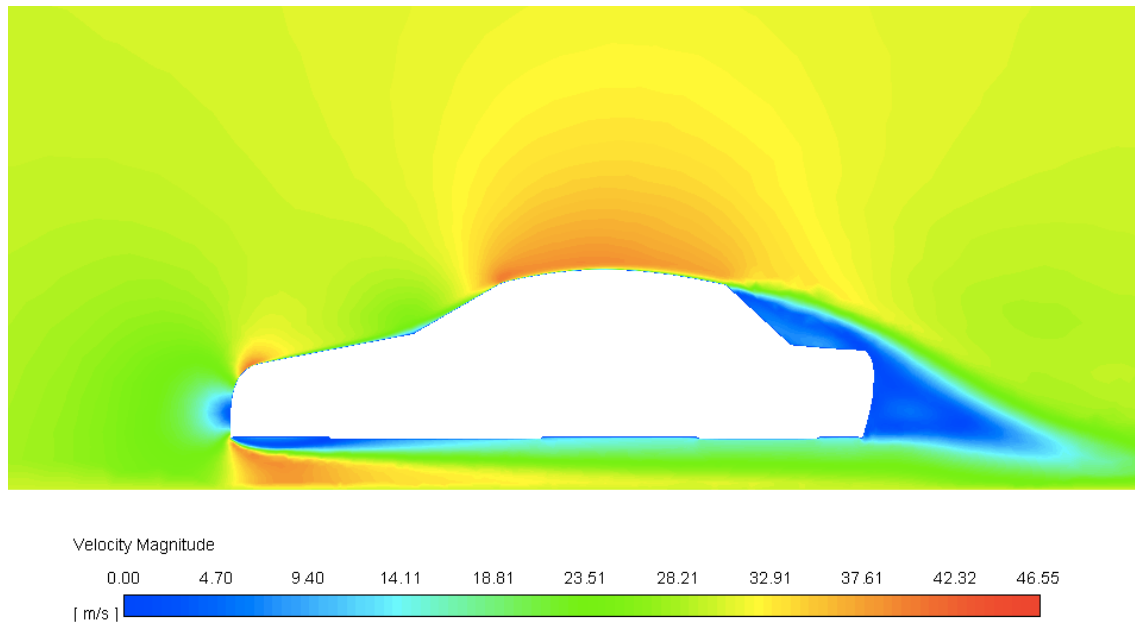
*Figura 36: Distribució de pressions del tercer mallat [Font pròpia]*

A partir de la distribució de pressions al voltant del vehicle, s'observa que el valor de la pressió mínima (en valor absolut) és superior al trobat anteriorment amb els anteriors mallats realitzats, però que les zones d'alta i baixa pressió del vehicle són les mateixes que les esmentades anteriorment.

Encara que ara el color que es veu representat al sostre és el verd, això no indica que la pressió al sostre sigui major ni positiva, sinó que el valor del coeficient de pressió amb l'escala de colors s'ha vist modificat degut a que la pressió mínima ha augmentat en valor absolut. D'aquesta manera, es pot veure que el valor del coeficient de pressió al sostre té un valor aproximat de -0,66 mentre que en el cas anterior era de -0,61.

### 5.3.3.2. Camp de velocitats

Seguidament s'ha representat el camp de velocitats pel model en estudi:



*Figura 37: Camp de velocitats del tercer mallat [Font pròpia]*

Pel que fa a la distribució de velocitats, s'observen encara millor amb aquest mallat les zones d'alta i baixa velocitat que amb el mallat anterior.

En canvi, els valors obtinguts de la velocitat del flux a través de les diferents parts del vehicle són pràcticament idèntics als trobats amb el segon mallat.

Anàlogament al cas anterior, s'han representat els vectors velocitat al voltant del vehicle:



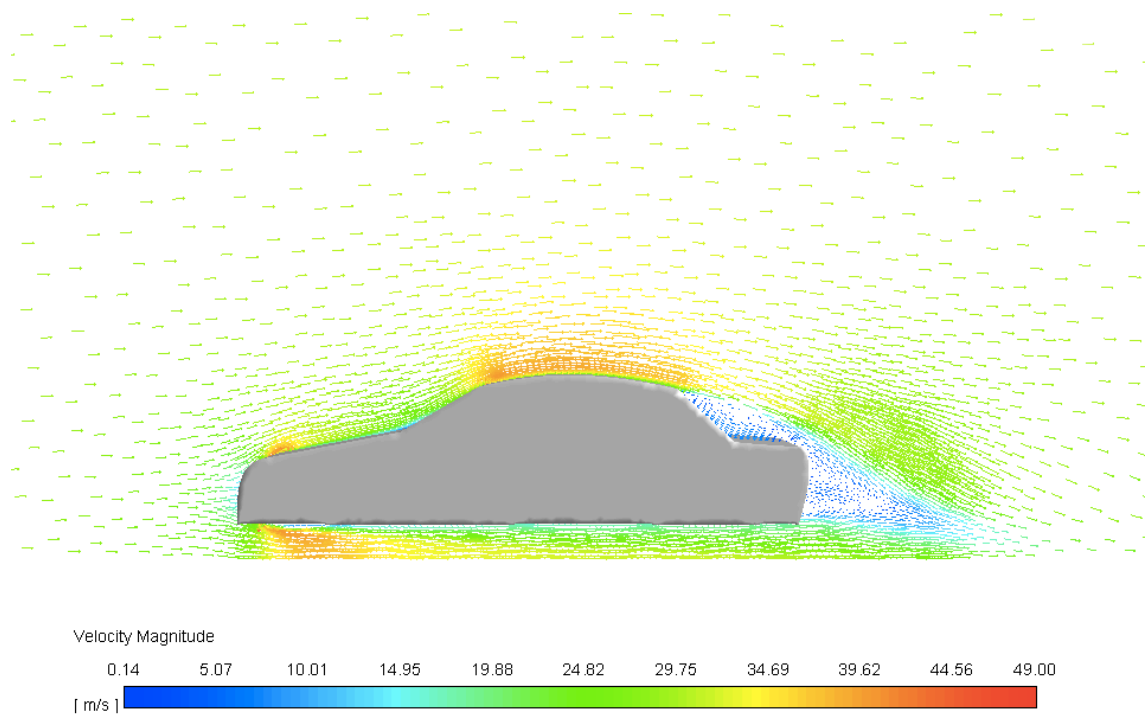


Figura 38: Vectors velocitat del tercer mallat [Font pròpia]

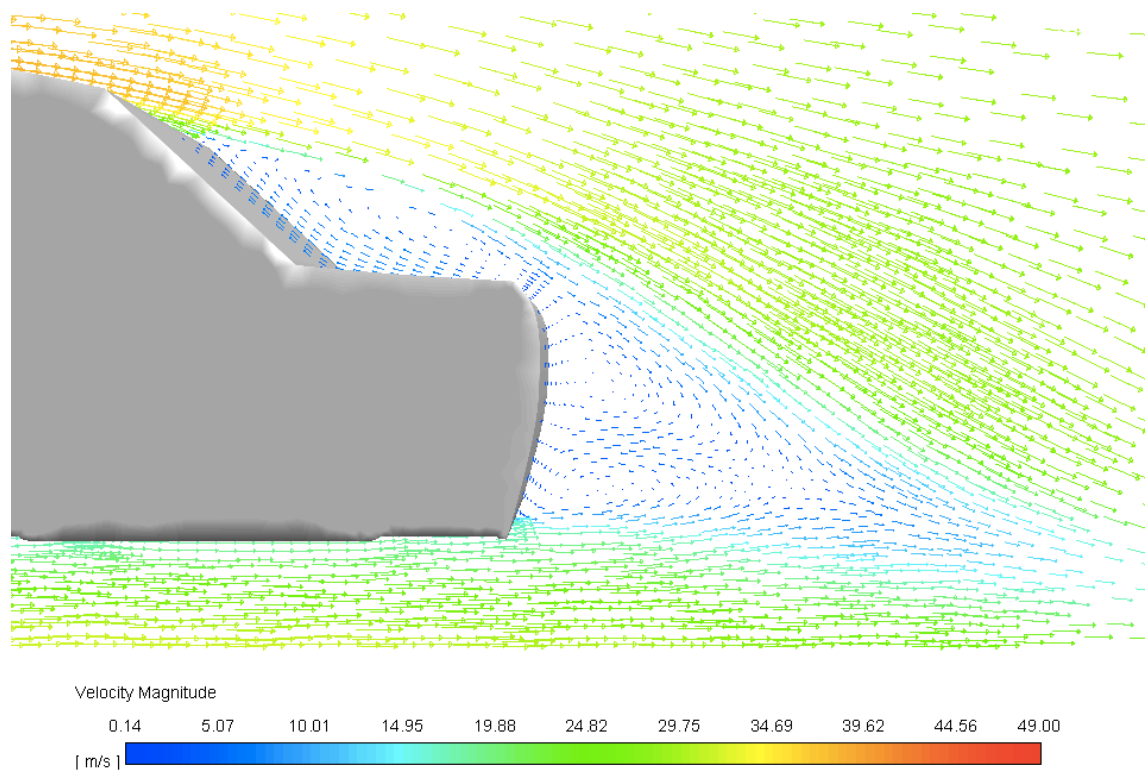


Figura 39: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del tercer mallat [Font pròpia]



Amb aquest nou mallat, es diferencien també els remolins formats a la part del darrera del vehicle tal i com s'observava al mallat anterior.

### 5.3.3.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics

Els resultats obtinguts dels paràmetres aerodinàmics un cop ha convergit la solució i s'ha observat que es mantenen constants són els següents:

|       |       |
|-------|-------|
| $c_L$ | 0,386 |
| $c_D$ | 0,439 |

Es pot veure com els coeficients aerodinàmics difereixen dels de la malla anterior un 5 % aproximadament, essent el coeficient de sustentació una mica superior i el coeficient de resistència a l'avanç una mica inferior.

Anàlogament al cas anterior, s'han representat les línies de corrent al voltant del vehicle:

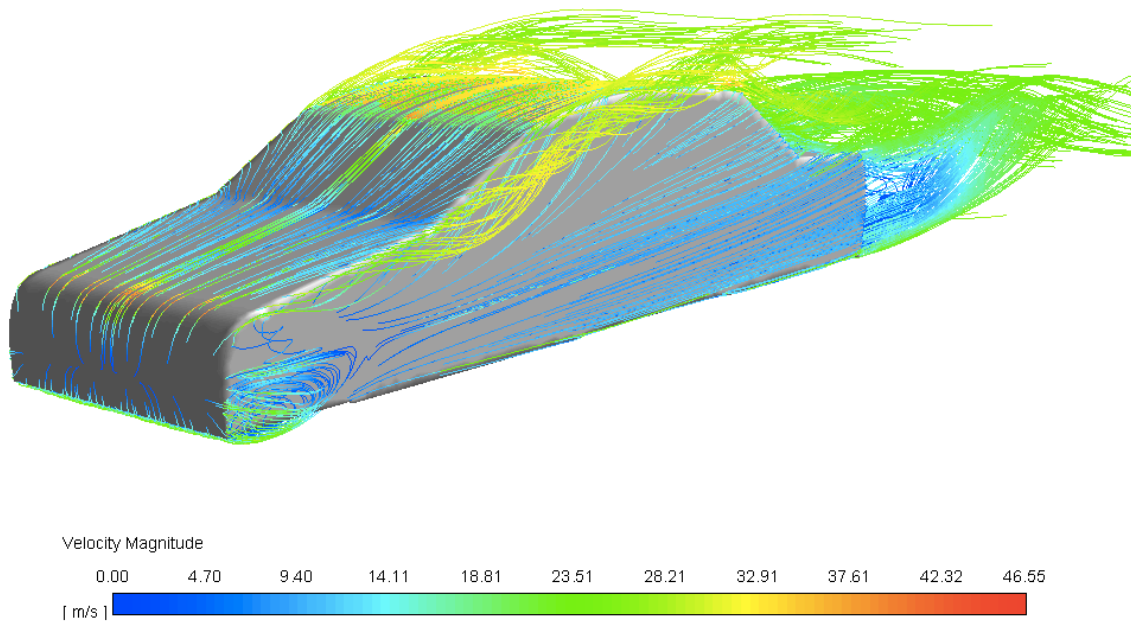
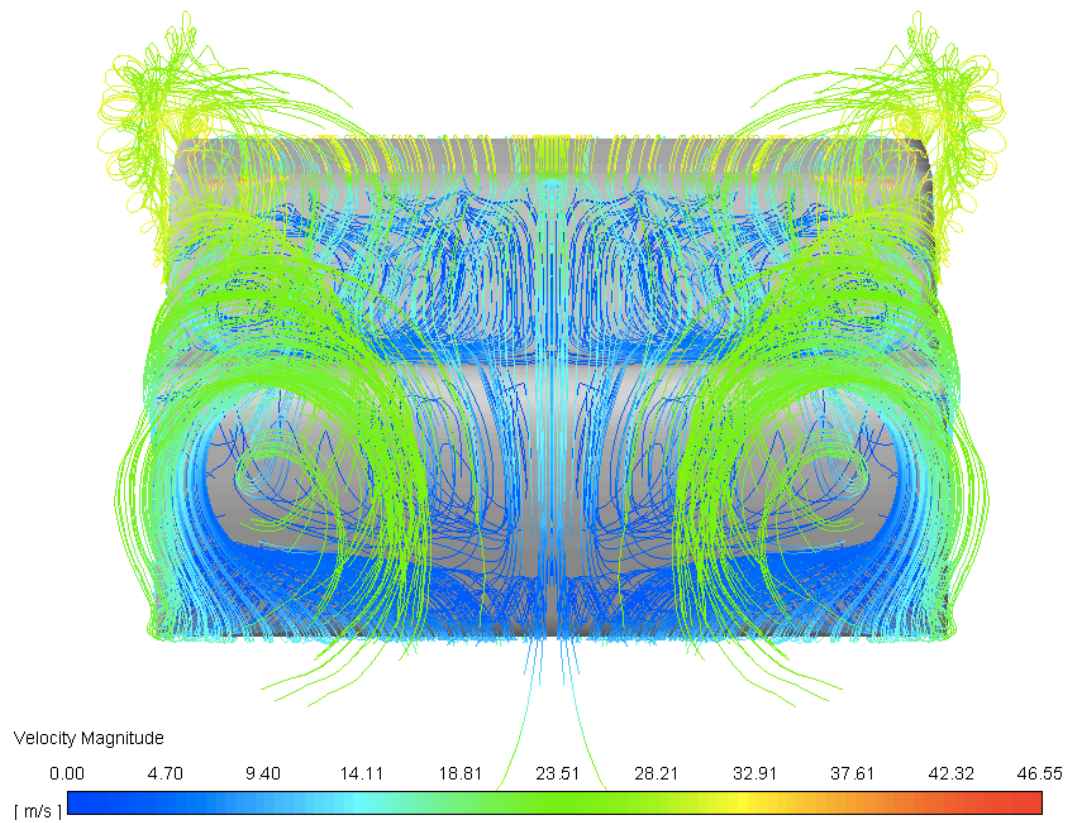


Figura 40: Línies de corrent del tercer mallat [Font pròpia]



*Figura 41: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del tercer mallat [Font pròpia]*

A diferència del segon mallat, es poden apreciar perfectament els remolins formats a la zona del parabrises així com els que apareixen a la part del darrera del vehicle.

## 5.4. Anàlisi del prototip variant la inclinació del capó

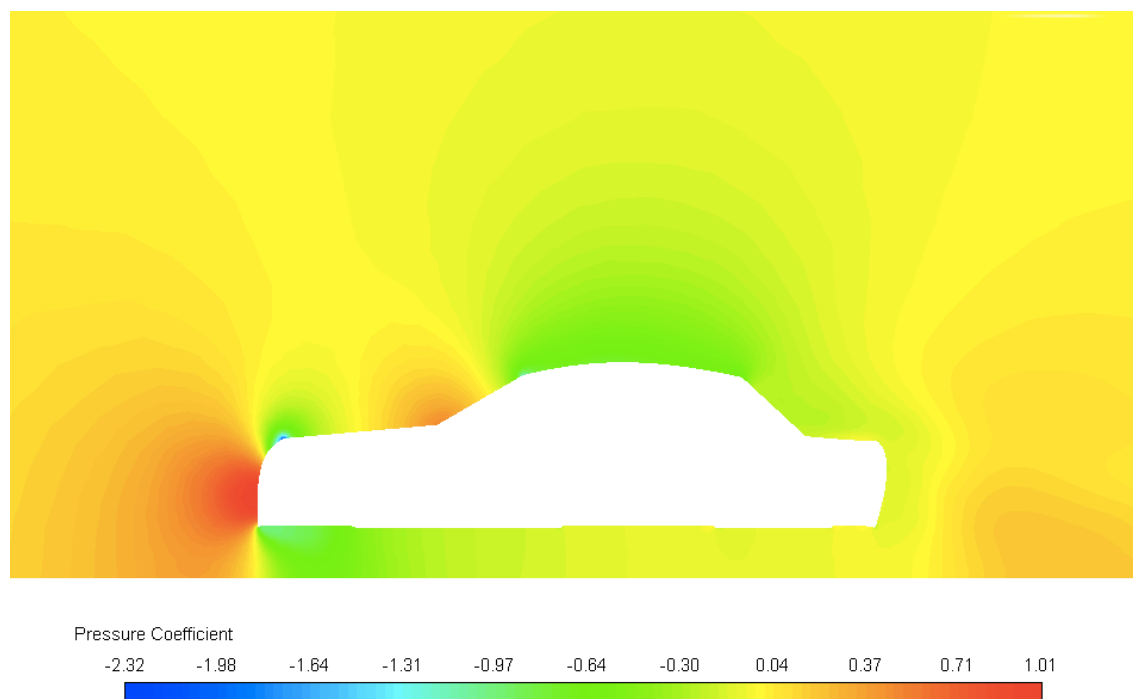
Tot seguit, s'ha procedit a fer l'estudi del model variant l'angle d'inclinació del capó per tal de comprovar el que s'ha explicat anteriorment sobre l'efecte que té la inclinació del capó sobre el coeficient de resistència a l'avanç.

Quant major sigui aquesta inclinació, menor és el coeficient de resistència a l'avanç ja que el flux s'adapta millor a la superfície i no pateix canvis bruscos de direcció al seu pas a través del vehicle.

L'estudi realitzat anteriorment amb la malla òptima (tercer mallat) proporciona el comportament del flux a través del vehicle per un angle d'inclinació del capó d'11°. A continuació, utilitzant el mallat òptim, s'ha realitzat l'estudi per angles inferiors a aquest amb l'objectiu de poder comparar els resultats obtinguts amb un gràfic que proporciona [1] sobre l'efecte que té l'angle d'inclinació del capó respecte el coeficient de resistència a l'avanç i poder verificar així l'existència d'aquest efecte.

### 5.4.1. Inclinació de 5°

A continuació es mostra el camp de pressions representat amb el coeficient de pressió:

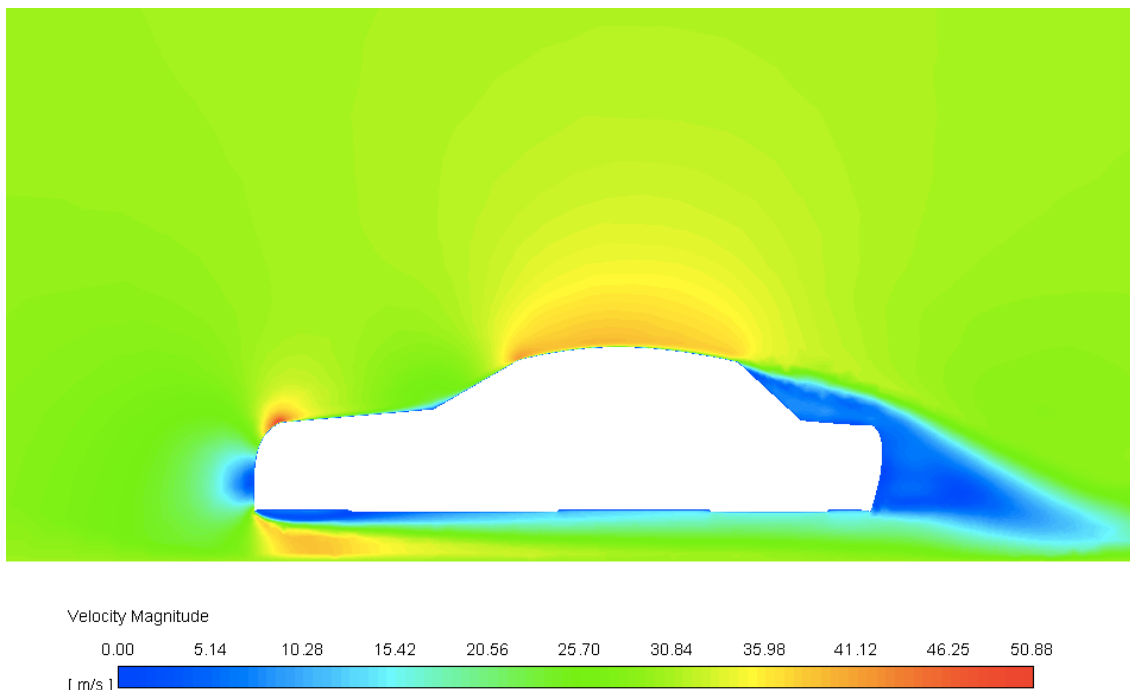


*Figura 42: Distribució de pressions del prototip amb una inclinació del capó de 5° [Font pròpia]*

A diferència de la geometria amb una inclinació d' $11^\circ$  pel capó, la zona d'alta pressió és més ampla que anteriorment degut que ara la superfície del para-xocs on impacta l'aire és major.

També es pot observar que la pressió mínima en valor absolut ha augmentat respecte a l'altre cas i que aquesta es produeix a la part inferior del capó.

Seguidament s'ha representat el camp de velocitats per la nova geometria:



*Figura 43: Camp de velocitats del prototip amb una inclinació del capó de  $5^\circ$  [Font pròpia]*

Aquí s'observa que la velocitat del flux a través del vehicle pràcticament és la mateixa que la que es tenia abans amb una inclinació del capó major però la zona del deixant és més gran, la qual cosa indica que hi ha més turbulència i pèrdua d'energia per una geometria d'aquestes característiques.

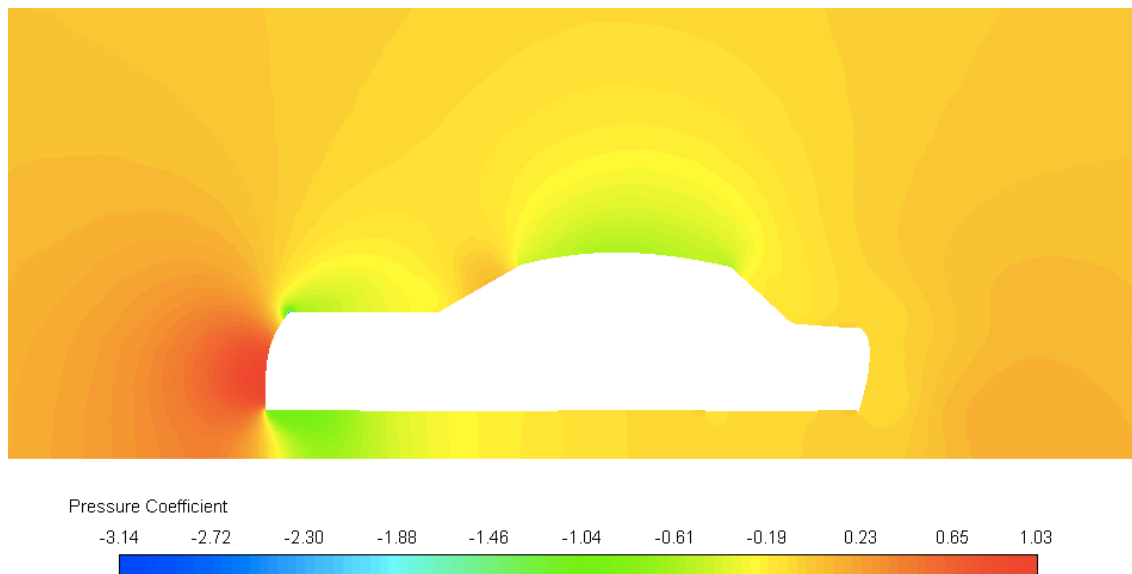
Finalment, els valors obtinguts dels paràmetres aerodinàmics són els següents:

|       |       |
|-------|-------|
| $c_L$ | 0,388 |
| $c_D$ | 0,471 |

Tal com era d'esperar amb aquesta inclinació del capó, inferior a l'anterior, ha augmentat el coeficient de resistència a l'avanç en aproximadament un 7 % mentre que el coeficient de sustentació s'ha mantingut pràcticament igual.

#### 5.4.2. Inclinació de 0°

A continuació es mostra el camp de pressions representat amb el coeficient de pressió:

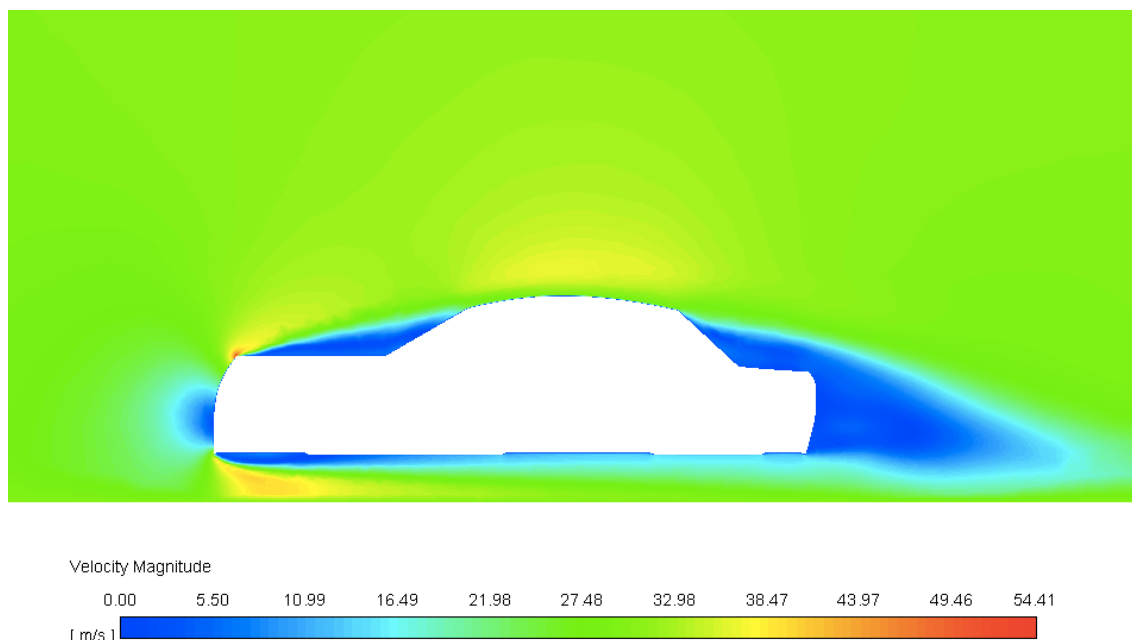


*Figura 44: Distribució de pressions del prototip amb una inclinació del capó de 0° [Font pròpia]*

En aquest cas, la zona d'alta pressió encara és major la qual cosa implicarà un augment en el coeficient de resistència a l'avanç.

També s'observa que la pressió mínima en valor absolut ha augmentat respecte a l'altre cas i que aquesta es produeix a la part inferior del capó. Succeeix també que la pressió en la zona de transició de capó a parabrises és negativa cosa que abans era sempre positiva.

Seguidament s'ha representat el camp de velocitats per la nova geometria:



*Figura 45: Camp de velocitats del prototip amb una inclinació del capó de  $0^\circ$  [Font pròpia]*

Es pot observar com es produeix un desprendiment de la capa límit just a la zona inferior del capó, degut a la brusca transició que pateix el flux i que provoca l'aparició de fortes turbulències. El deixant que es forma a la part del darrera del vehicle és també més pronunciat que el que es produïa amb la inclinació anterior.

Els valors obtinguts dels paràmetres aerodinàmics per aquesta darrera geometria són els següents:

|       |       |
|-------|-------|
| $c_L$ | 0,309 |
| $c_D$ | 0,522 |

Amb el capó totalment horitzontal, es pot veure com ha augmentat el coeficient de resistència a l'avanç un 10 % respecte el cas anterior mentre que el coeficient de sustentació s'ha reduït un 20 % aproximadament. Això implica que un vehicle amb una geometria com aquesta, necessitaria d'un motor de gran potència per poder moure's.

### 5.4.3. Comparativa segons la inclinació

A continuació es mostra la taula amb els valors del coeficient de resistència a l'avanç obtingut per les diferents geometries estudiades:

| Inclinació | $c_D$ |
|------------|-------|
| 0°         | 0,52  |
| 5°         | 0,47  |
| 11°        | 0,44  |

Com s'ha pogut observar anteriorment, quant major és la inclinació del capó menor és el coeficient de resistència a l'avanç i millors són les propietats del vehicle en quant al flux d'aire que el travessa. Però, a partir dels 11° d'inclinació del capó, el  $c_D$  ja no varia degut a la distribució del flux a través del vehicle i només s'aconsegueix una reducció de l'àrea del para-xocs la qual cosa no interessa ja que proporciona menor seguretat al vehicle.

Per tal de poder comparar l'efecte que té la inclinació del capó sobre el coeficient de resistència a l'avanç pel prototip de cotxe convencional creat, es disposa dels valors reals d'un cotxe convencional.

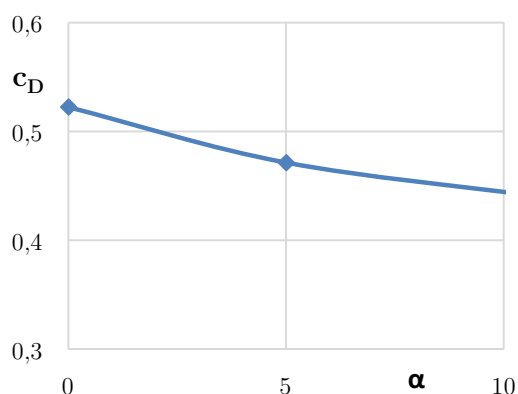


Figura 46: Valor obtingut del  $c_D$  respecte la inclinació  $\alpha$  del capó [Font pròpia]

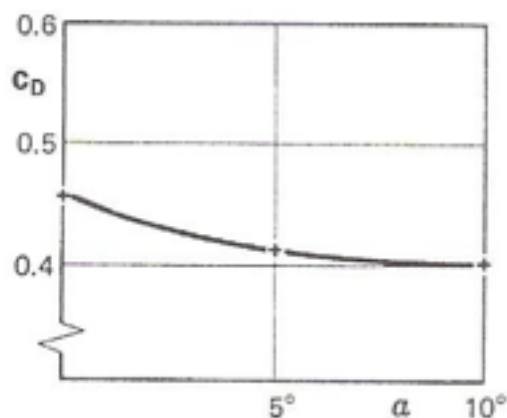


Figura 47: Valor real del  $c_D$  respecte la inclinació  $\alpha$  del capó [1]

A partir dels gràfics anteriors, encara que el prototip creat dista bastant de la realitat ja que no posseeix ni les rodes ni els detalls que pot arribar a tenir un vehicle convencional real a la seva geometria, es pot veure clarament que aquests elements no influeixen en gran mesura en l'efecte que es dona per la inclinació del capó i com el coeficient de resistència a l'avanç disminueix segons s'augmenta aquesta inclinació.

## 5.5. Anàlisi del prototip afegint un spoiler davanter

### 5.5.1. Descripció de l'spoiler

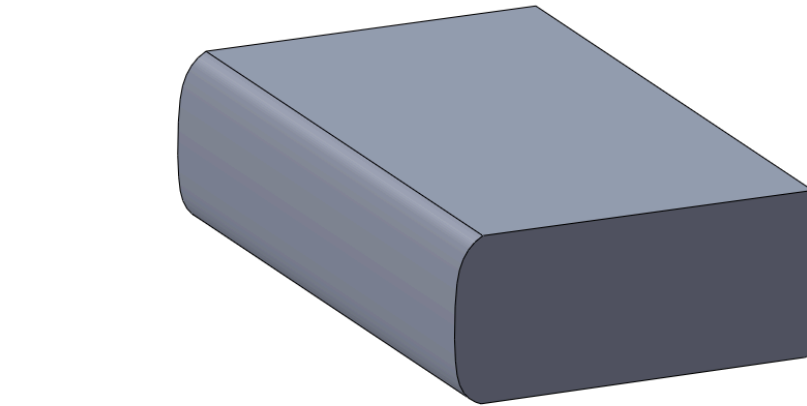
L'spoiler davanter té per objectius:

- **Reduir el *drag*.** Aquest efecte es basa en el fet que l'spoiler davanter disminueix la velocitat de l'aire a sota del vehicle i, per tant, atenua la contribució d'aquesta part rugosa i poc aerodinàmica sobre la resistència a l'avanç. Però, per altra banda, aquest efecte positiu sobre el *drag* es veu parcialment compensat per l'increment degut a l'augment de l'àrea frontal del vehicle degut a la utilització d'aquest spoiler.
- **Proporcionar adherència a l'eix davanter.** Aquesta disminució de *lift* s'aconsegueix degut a l'efecte succió que té lloc a la part del darrera de l'spoiler on es genera una zona de baixa pressió.
- **Organitzar el flux a través del vehicle.** El flux d'aire que impacte sobre un vehicle, sobretot quan es circula darrera d'un altre vehicle, és turbulent i està desorganitzat. Una altra de les funcions de l'spoiler és organitzar aquest flux fent que s'adapti millor a la geometria del cotxe.

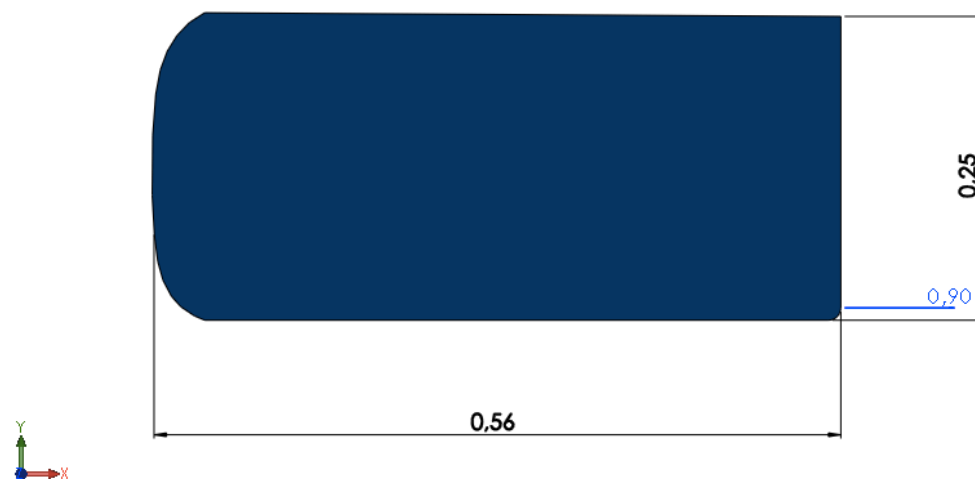
Pel que fa al model de cotxe estudiat fins ara al llarg del projecte, s'ha dissenyat un spoiler davanter simple, amb l'objectiu de veure els efectes que causa sobre el flux de l'aire que travessa el vehicle.

A continuació es mostra l'spoiler creat a partir de SolidWorks i les seves dimensions mesurades en metres:



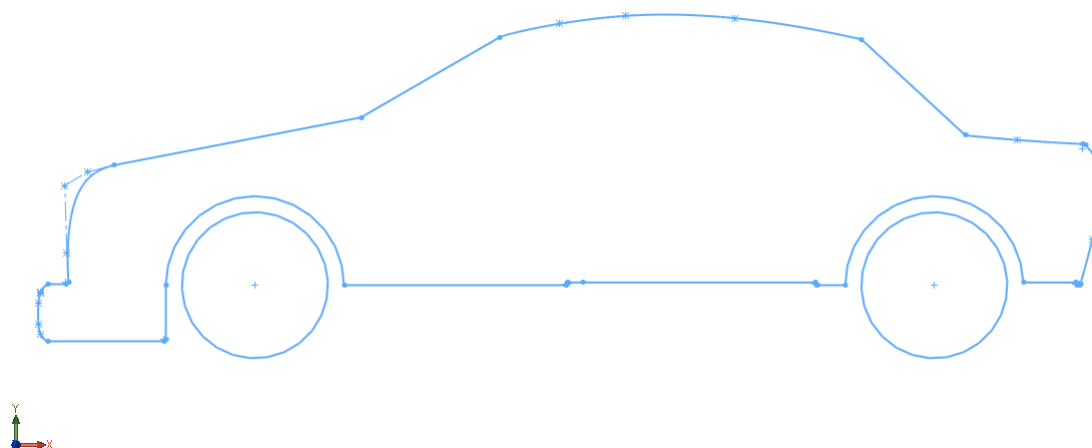


*Figura 48: Geometria de l'spoiler creada mitjançant CAD [Font pròpia]*



*Figura 49: Geometria de l'spoiler acotada [Font pròpia]*

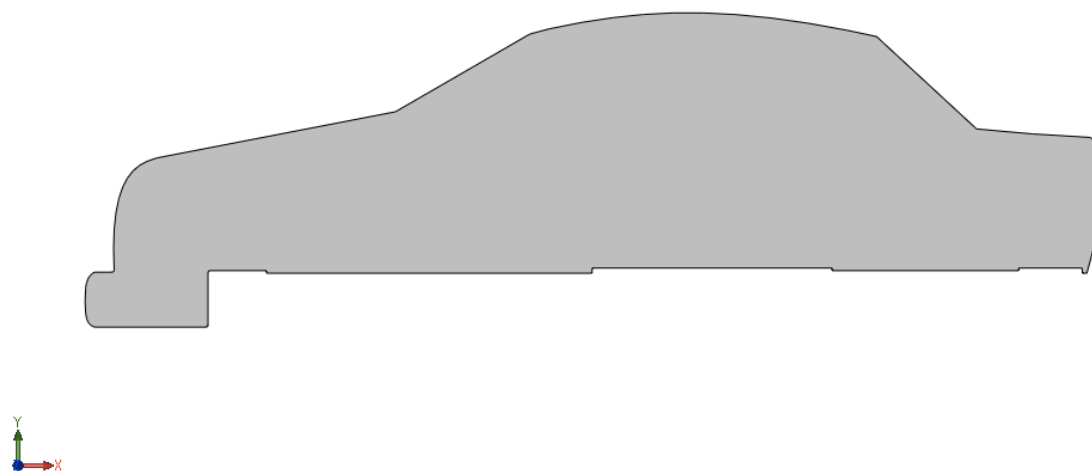
Seguidament, es representa la incorporació d'aquest nou element a la geometria del prototip en estudi:



*Figura 50: Croquis de la geometria del prototip de cotxe convencional amb spoiler creat mitjançant CAD*  
[Font pròpia]

De la mateixa manera que abans, l'estudi amb ANSYS i les simulacions s'han realitzat amb les simplificacions de geometria esmentades anteriorment per tal d'aconseguir uns resultats fiables i tenir una idea dels fenòmens que apareixen.

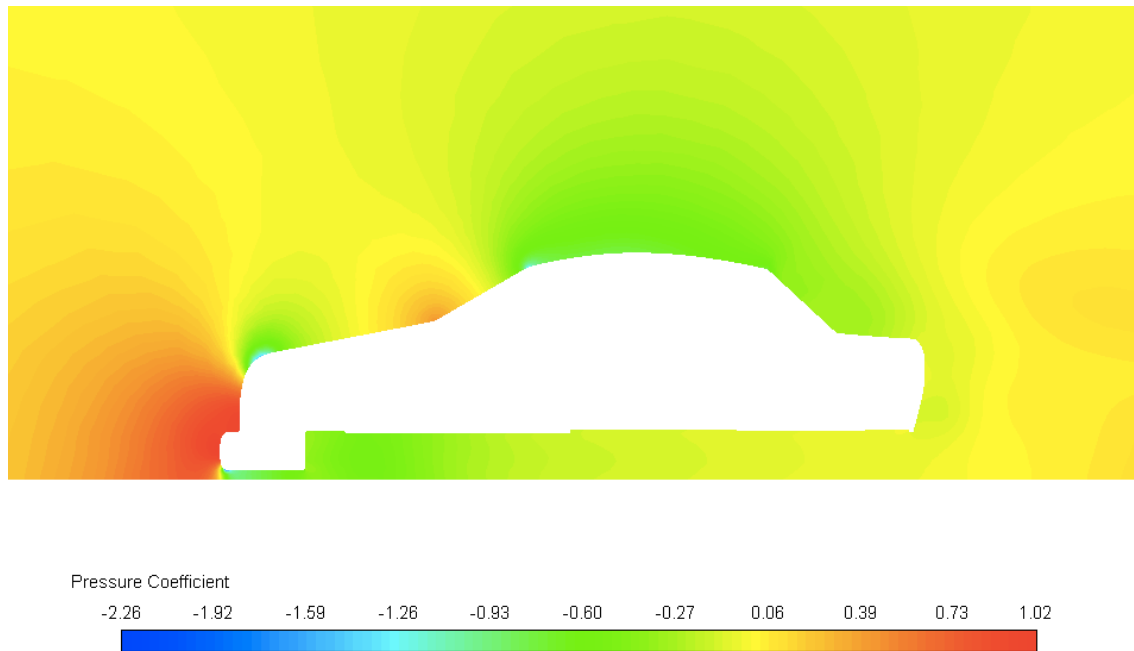
Aquesta geometria utilitzada per l'estudi és la següent:



*Figura 51: Geometria del prototip de cotxe convencional amb spoiler creada mitjançant CAD* [Font pròpia]

### 5.5.2. Camp de pressions

A continuació es mostra el camp de pressions representat amb el coeficient de pressió:



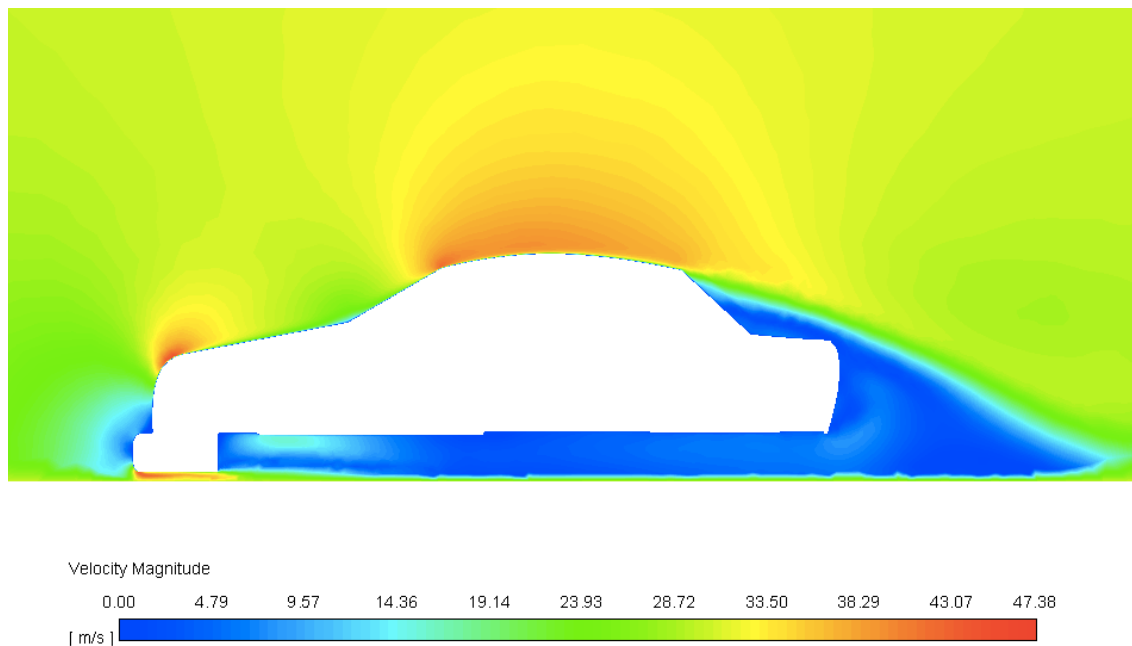
*Figura 52: Distribució de pressions del prototip amb spoiler [Font pròpia]*

Es pot observar com la pressió al darrera de l'spoiler és negativa, com s'ha dit anteriorment, mentre que després l'aire segueix travessant la part inferior del vehicle i la pressió passa a ser positiva.

També es veu que, igual que abans, la zona que pateix una pressió més elevada és la part frontal del vehicle incloent ara la part davantera de l'spoiler.

### 5.5.3. Camp de velocitats

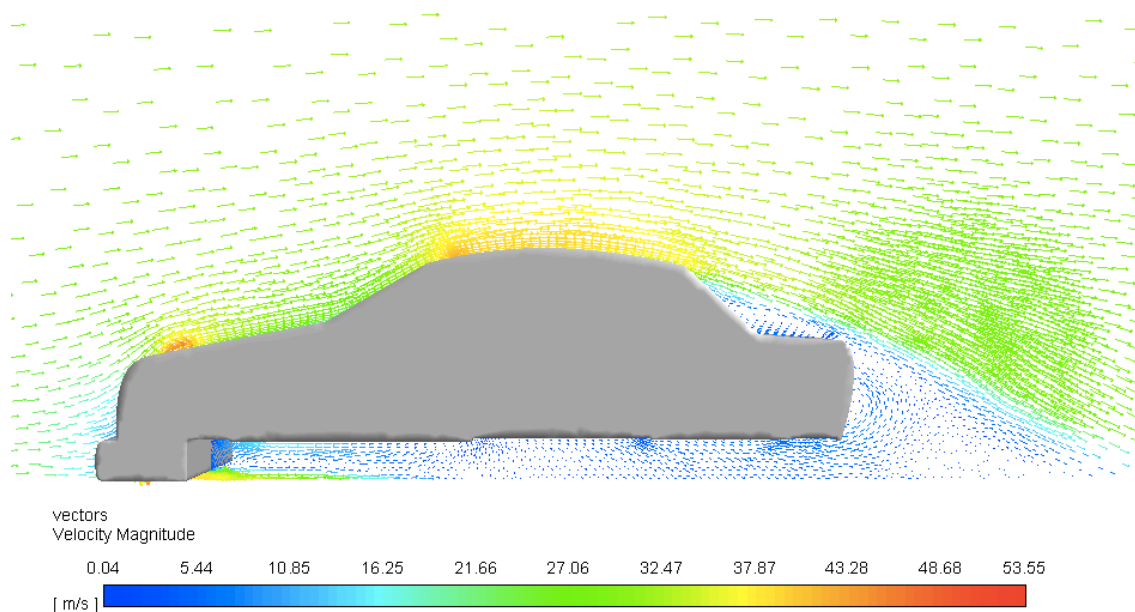
Seguidament s'ha representat el camp de velocitats pel model en estudi:



*Figura 53: Camp de velocitats del prototip amb spoiler [Font pròpia]*

Pel que fa a la distribució de velocitats, s'observa com l'spoiler redueix la velocitat de l'aire que travessa la part inferior del vehicle contribuint així a una reducció del *lift* i aconseguint una millor adherència i estabilitat del vehicle.

Tanmateix, l'aire es continua accelerant quan travessa el sostre del vehicle com s'ha comentat anteriorment durant el projecte.



*Figura 54: Vectors velocitat del prototip amb spoiler [Font pròpia]*

Mirant els vectors velocitat, es pot veure com el flux es torna a enganxar al vehicle un cop es desprèn de la part inferior de l'spoiler així com la recirculació del flux a la part del darrere del vehicle.

#### 5.5.4. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics

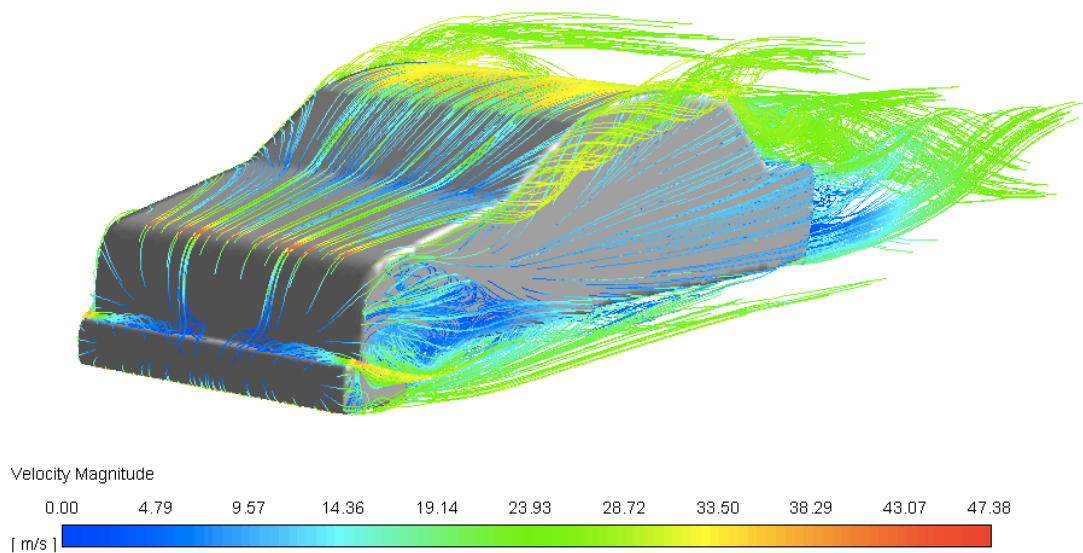
Els resultats obtinguts dels paràmetres aerodinàmics un cop ha convergit la solució i s'ha observat que es mantenen constants són els següents:

|       |       |
|-------|-------|
| $c_L$ | 0,192 |
| $c_D$ | 0,449 |

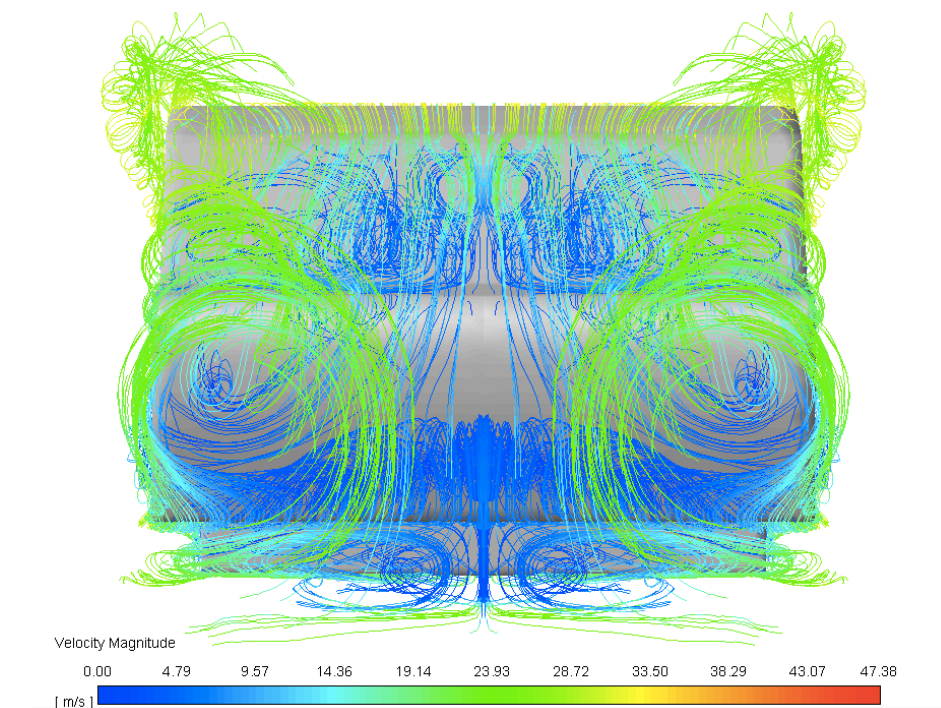
Es pot veure com el coeficient de resistència a l'avanç és un 2,5 % superior a l'obtingut en la geometria que no contemplava l'spoiler. Amb aquesta simulació doncs, no es pot apreciar la reducció de *drag* de la que es parlava anteriorment que produïa l'spoiler degut a que, al no contemplar les rodes a l'estudi (que són una de les fonts generadores de *drag*), el *drag* que s'aconsegueix reduir amb l'spoiler és inferior al *drag* que es genera per haver augmentat l'àrea frontal.

En canvi, si que es pot apreciar el descens del *lift* d'aproximadament un 50 % a l'obtingut amb la geometria sense l'spoiler.

Anàlogament als estudis posteriors, s'han representat les línies de corrent al voltant del vehicle per veure els vòrtex i remolins que es formen quan l'aire travessa el vehicle:



*Figura 55: Línies de corrent del prototip amb spoiler [Font pròpia]*



*Figura 56: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del prototip amb spoiler [Font pròpia]*

## 6. Segon model: prototip cotxe esportiu

### 6.1. Geometria

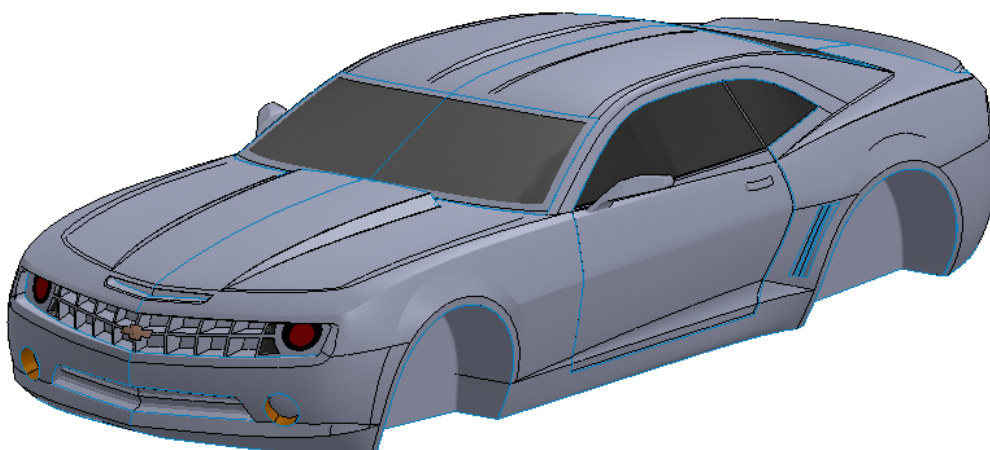
Per tal d'estudiar ara el comportament del flux d'aire a través d'un cotxe esportiu, s'ha creat un segon prototip mitjançant CAD basat en el vehicle Chevrolet Camaro SS del 2015.

Primerament s'ha dissenyat la part de la carrosseria del cotxe mitjançant superfícies amb l'ajuda de SolidWorks. Un cop acabada la geometria sense les rodes, per tal de poder-la importar a l'ANSYS, aconseguir un bon mallat i poder realitzar les simulacions per obtenir els resultats, s'han hagut de fer simplificacions al prototip com les que s'han fet al primer model.

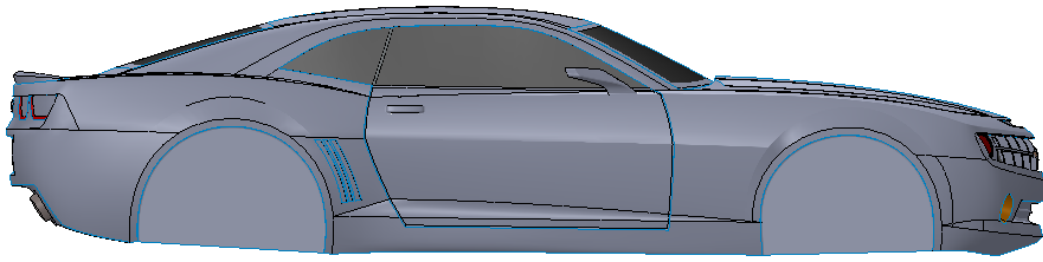
D'aquesta manera, s'ha procedit a eliminar els detalls de la geometria del cotxe així com tancar les superfícies per tal de formar un únic sòlid. A més, ara s'ha considerat un fons pla, diferent al fons rugós utilitzat en el primer model.

Les dimensions del model creat són les següents:

|          |        |
|----------|--------|
| Altura   | 1,29 m |
| Llargada | 4,72 m |
| Amplada  | 1,88 m |

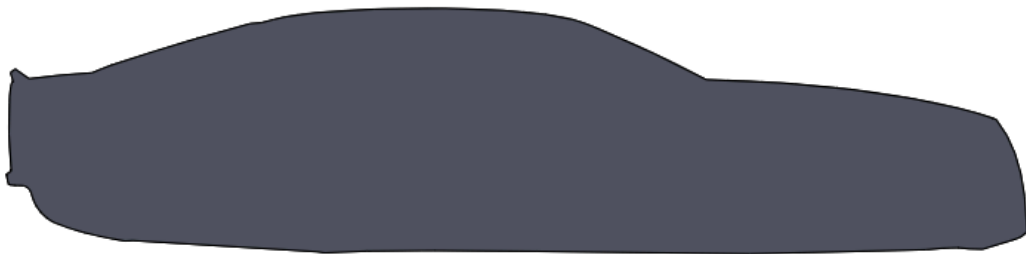


*Figura 57: Geometria del Chevrolet Camaro SS creada mitjançant CAD [Font pròpia]*



*Figura 58: Geometria del Chevrolet Camaro SS vista de perfil [Font pròpia]*

La geometria analitzada en ANSYS un cop tancades totes les superfícies i conformant un únic sòlid és la següent:



*Figura 59: Geometria del prototip de cotxe esportiu creada mitjançant CAD [Font pròpia]*

### 6.1.1. El fons pla

L'objectiu principal dels cotxes esportius així com dels de competició, és aconseguir la major adherència possible al terra utilitzant la càrrega aerodinàmica (*downforce*).

La càrrega aerodinàmica es genera quan, en un perfil, el flux de l'aire que va per sota d'aquest és de baixa pressió. Aleshores, la pressió de l'ambient que hi ha a sobre del perfil empeny el vehicle cap al terra.



Per tal d'assegurar que l'aire que circula per la part de sota del vehicle ho faci a la màxima velocitat possible, és necessari que els baixos del cotxe siguin el més plans possibles. Per això, es col·loca un fons pla que evita que l'aire circuli pels diferents elements mecànics del vehicle com ara suspensions i escapaments.

El fons pla (o *undertray*, en anglès) consisteix en una planxa situada a la part inferior del cotxe que modifica la seva geometria i, per tant, modifica la distribució de pressions en aquesta zona.

Per altra banda, la part final del fons pla i que incrementa la altitud del fons respecte el terra de forma gradual es coneguda amb el nom de difusor.

L'increment de secció del difusor, provoca una disminució de la velocitat de l'aire i un increment de la pressió. Tenint en compte que la pressió en el deixant del vehicle és negativa i que està més influenciada per l'aire que circula per sobre del vehicle i pels costats que per l'aire que circula per sota, això provoca que la pressió a l'inici del difusor sigui encara més petita.

D'aquesta manera s'aconsegueix una succió que accelera el flux per sota del vehicle i genera *downforce*.

Per tant, degut a la importància del fons pla/difusor en cotxes esportius, aquest s'ha incorporat a la geometria del prototip de Chevrolet Camaro SS.

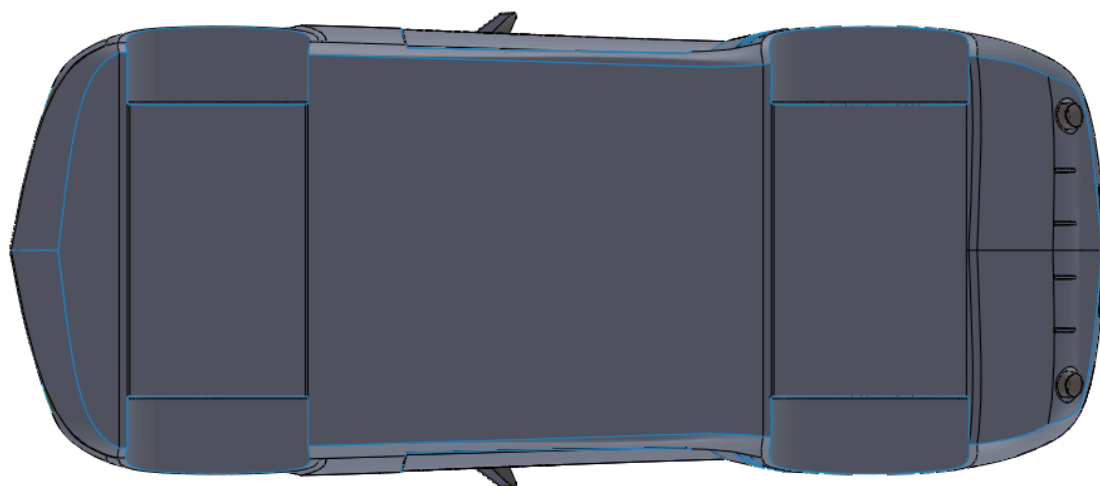
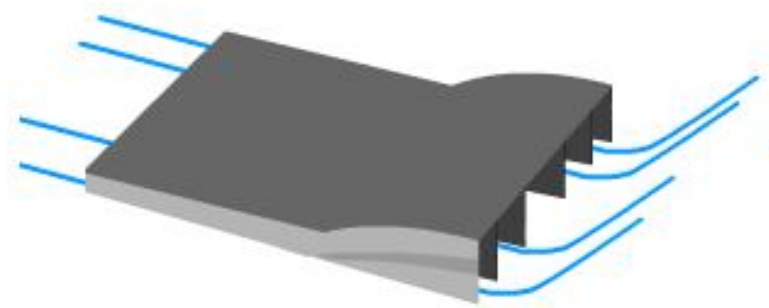


Figura 60: Fons pla del Chevrolet Camaro SS [Font pròpia]



*Figura 61: Difusor del Chevrolet Camaro SS [10]*



*Figura 62: Geometria d'un difusor típic d'un vehicle esportiu [10]*

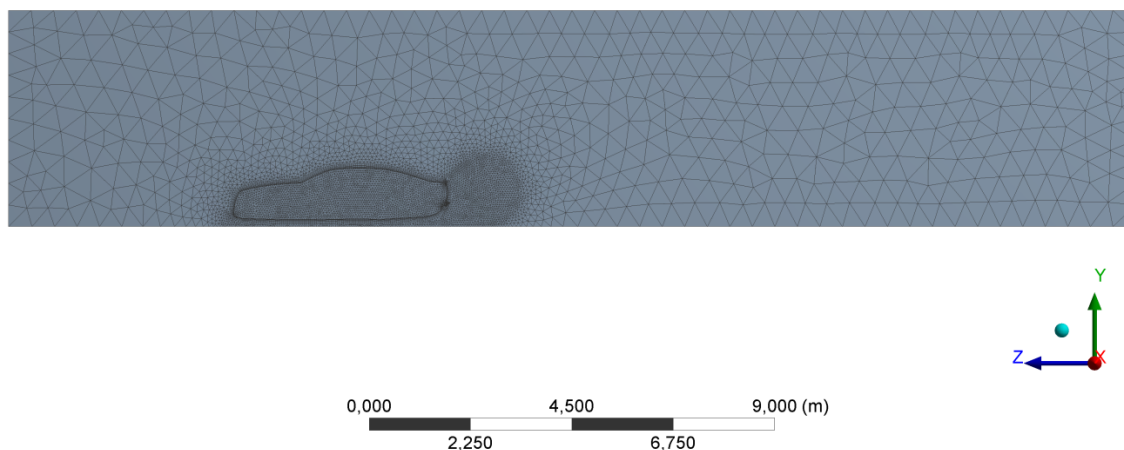
## 6.2. Mallat

Per aquest model de vehicle esportiu, s'ha decidit emprar la mateixa metodologia que en el cas del prototip de vehicle convencional a l'hora de crear la malla òptima que assegurí els resultats més precisos i fiables.

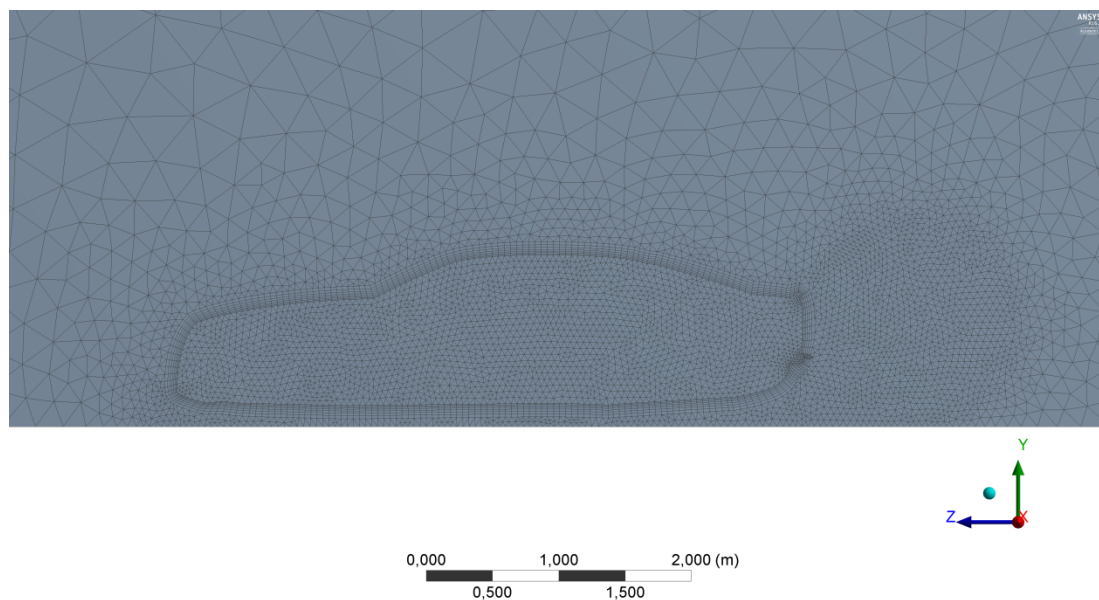
A continuació es llisten les operacions realitzades per la creació d'aquest darrer mallat:

- **Patch conforming method:** s'ha aplicat l'algoritme mitjançant tetraedres per obtenir, igual que anteriorment, la millor qualitat de malla possible.
- **Mallat del volum de control:** s'ha realitzat un mallat amb una mida d'element de 0,5 m per tot el volum de control.
- **Refinat del volum entre el terra i la part inferior del vehicle:** s'ha realitzat el refinat d'aquesta zona utilitzant una mida d'element de 0,046 m.
- **Refinat del volum a la part de darrera del vehicle:** s'ha realitzat el refinat d'aquesta zona del vehicle amb una mida d'element de 0,046 m.
- **Mallat de les superfícies del vehicle:** s'ha realitzat un mallat amb una mida d'element de 0,046 m per totes les superfícies del vehicle.
- **Definició de la capa límit:** s'ha definit la capa límit al voltant del vehicle amb un total de 7 capes, un rati de creixement del 20 % i un gruix màxim de 0,1 m.

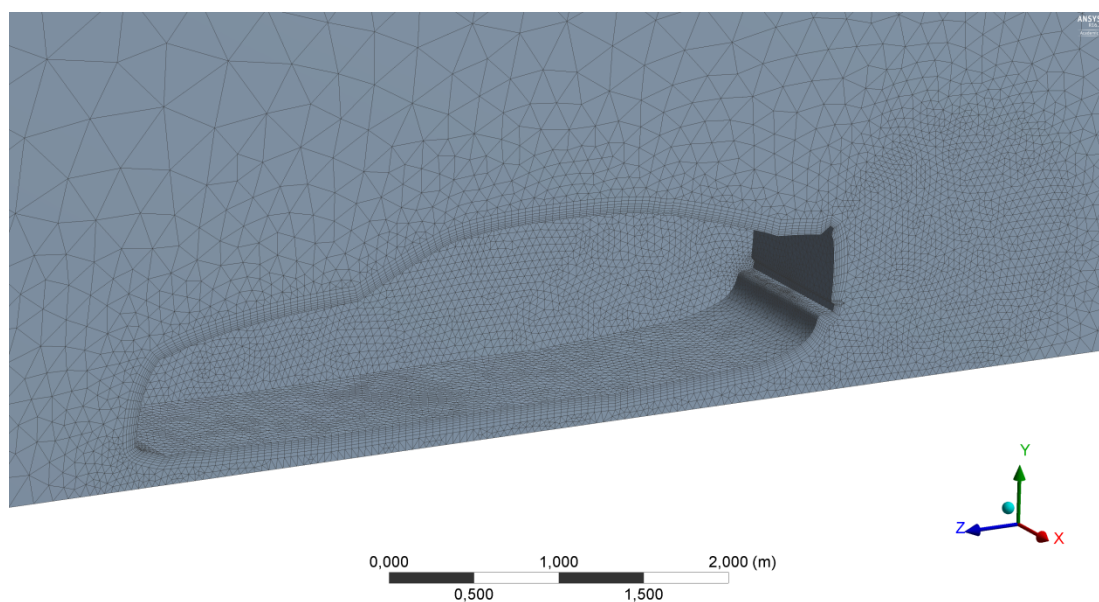
El nombre total de nodes i elements utilitzats per aquest mallat ha sigut de 132.497 i 506.238 respectivament.



*Figura 63: Mallat del volum de control del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*



*Figura 64: Detall del mallat del prototip de cotxe esportiu vist de perfil [Font pròpia]*



*Figura 65: Detall del mallat del prototip de cotxe esportiu vist des d'un cert angle [Font pròpia]*

Per aquest darrer mallat realitzat, degut a que s'ha incrementat la mida dels elements del volum de control, s'ha cregut adient il·lustrar la homogeneïtat de la malla per veure com, tot i haver realitzat aquest canvi, el creixement dels elements segueix essent progressiu i homogeni.

A tal efecte, s'ha fet un tall de secció i s'ha ampliat aquesta zona per poder diferenciar tant els elements que formen la capa límit com els que formen la resta del volum de control.

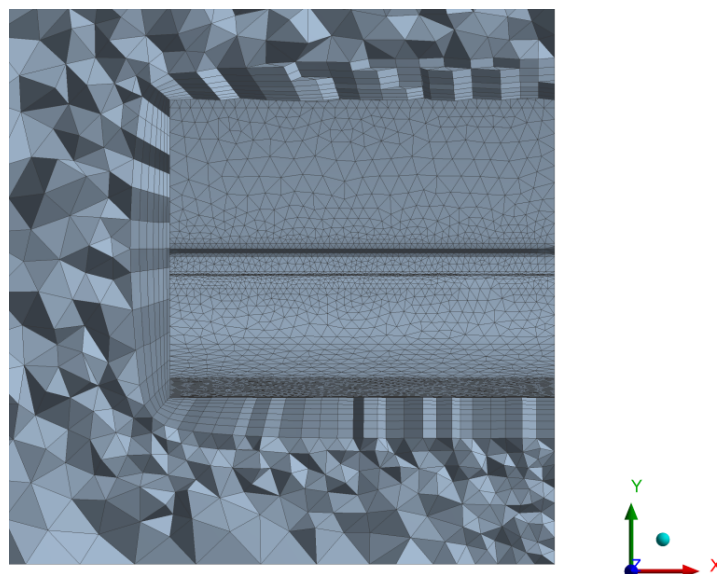


Figura 66: Tall d'una secció del mallat del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]

D'aquesta manera es pot veure com la mida dels elements que conformen la malla es manté constant al voltant del cos del vehicle i creix, de manera progressiva, a l'apropar-se a la zona exterior d'aquest.

Anàlogament als mallats realitzats anteriorment, s'ha procedit a comprovar la qualitat de la nova malla, utilitzant els paràmetres *aspect ratio* i *skewness*. Aquests es veuen representats a continuació:

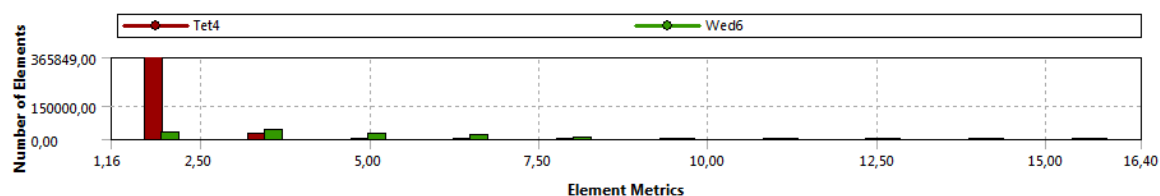


Figura 67: Representació de l'aspect ratio del mallat del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]

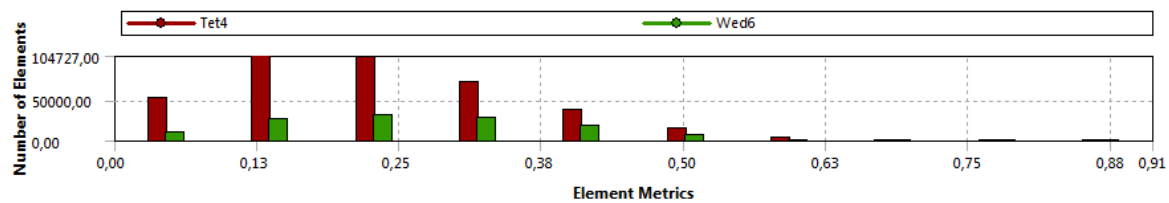


Figura 68: Representació de l'skewness del mallat del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]

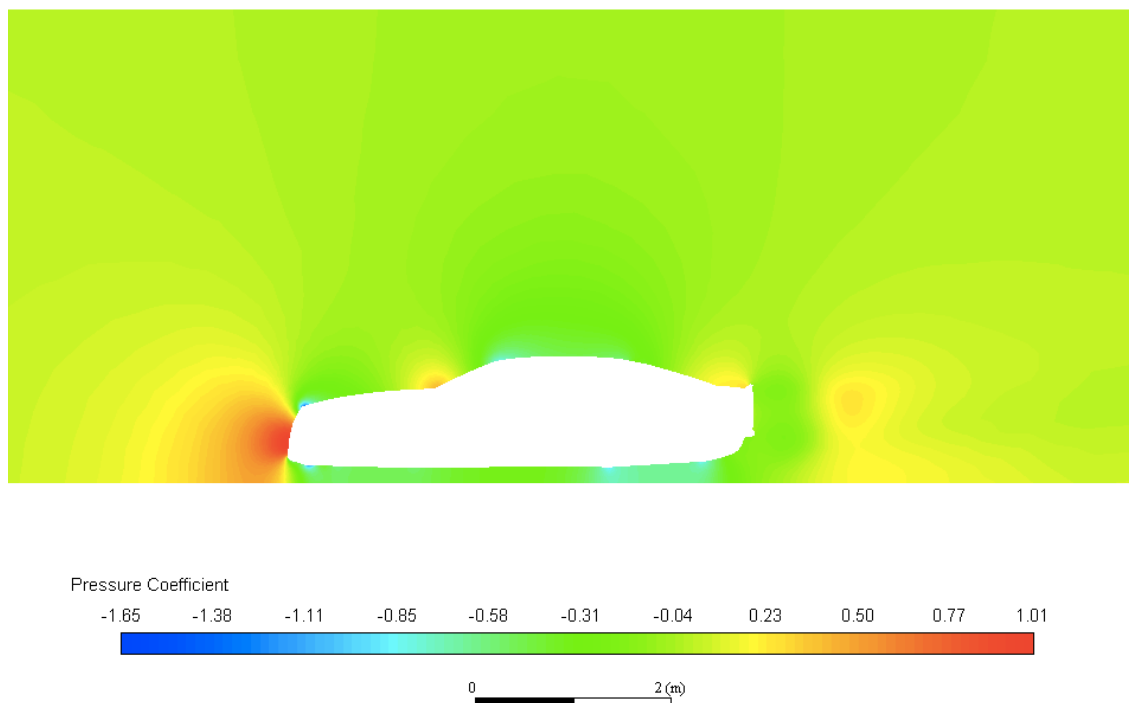
Pel que fa a l'*aspect ratio*, es pot observar com el 72 % dels elements presenten un valor d'aquest paràmetre d'1,5 aprox., proper a la unitat, que indica que aquesta malla té una bona qualitat.

D'altra banda, la major part dels elements presenten un valor d'asimetria inferior a 0,3 podent considerar la malla apta per a les simulacions.

## 6.3. Resultats obtinguts

### 6.3.1. Camp de pressions

A continuació es mostra el camp de pressions representat pel coeficient de pressió:



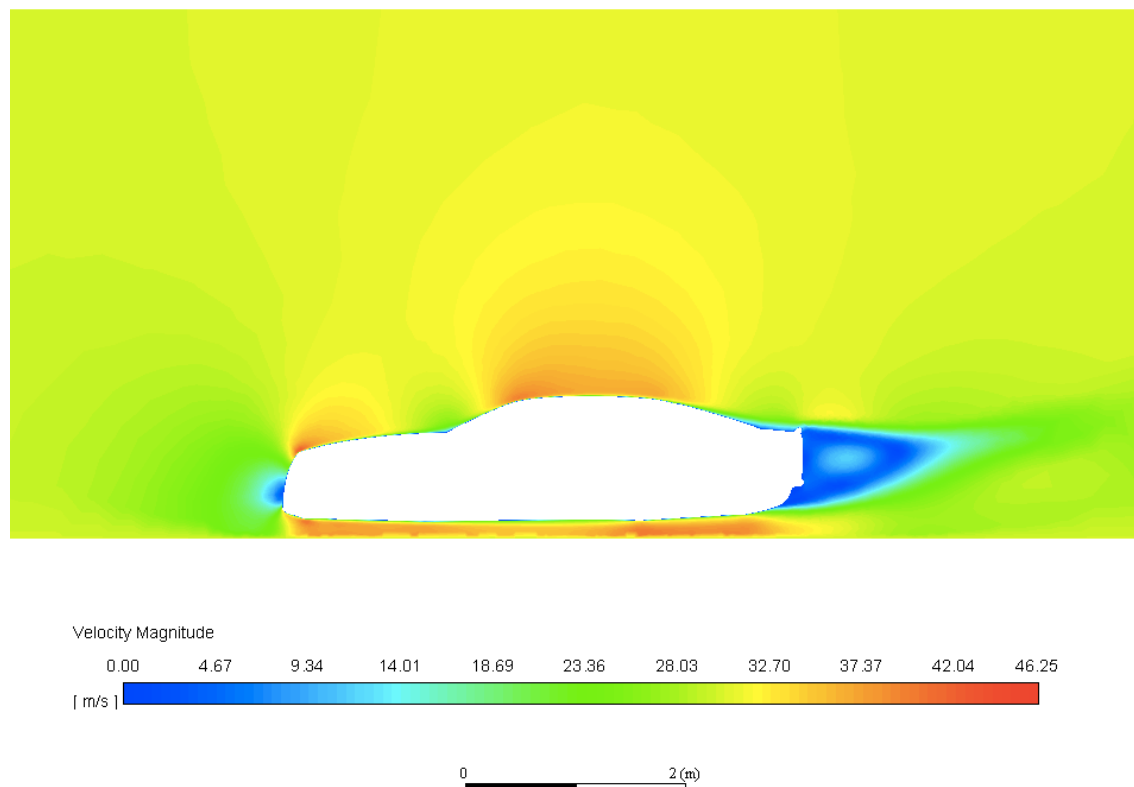
*Figura 69: Distribució de pressions del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*

En aquest cas, es pot observar com les parts del vehicle que estan sotmeses a una pressió major són la part davantera i la part baixa del parabrises, tot coincidint amb les trobades en el vehicle convencional.

D'altra banda, les zones que estan sotmeses a una depressió més elevada són aquelles on l'aire pateix canvis de trajectòria bruscos i s'accelera. Aquestes són: la cantonada superior i inferior de la part davantera del vehicle, la cantonada superior del parabrises i la zona del fons pla on comença el difusor.

### 6.3.2. Camp de velocitats

Seguidament, s'ha representat el camp de velocitats pel model en estudi:

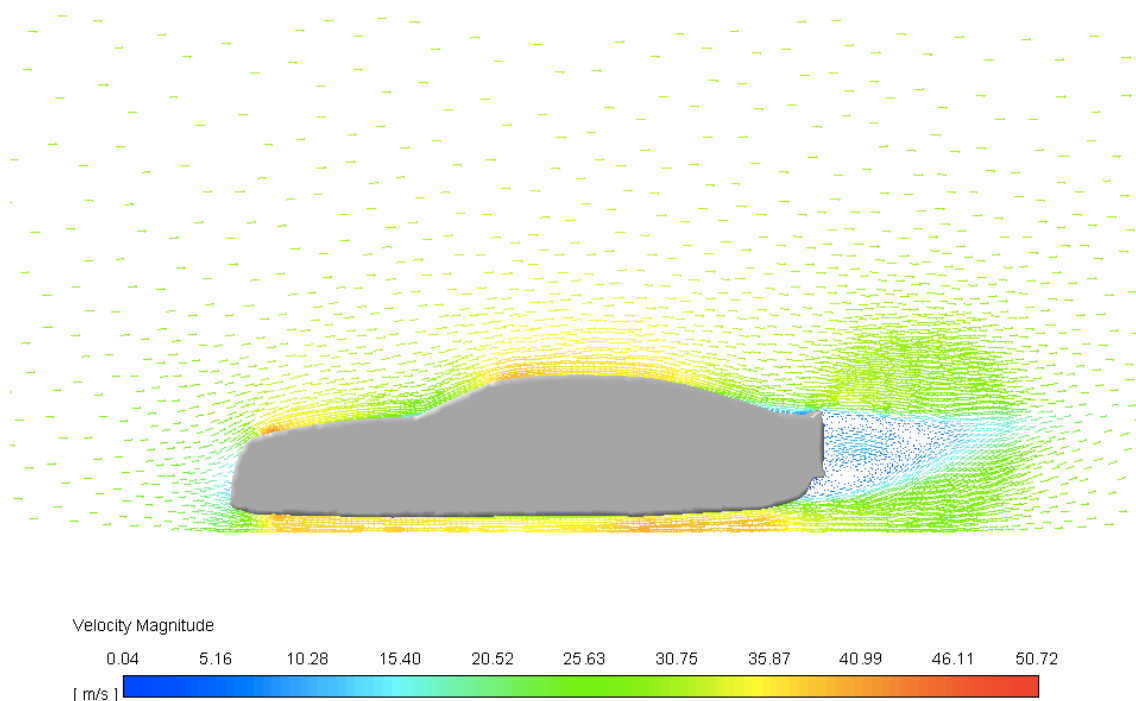


*Figura 70: Camp de velocitats del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*

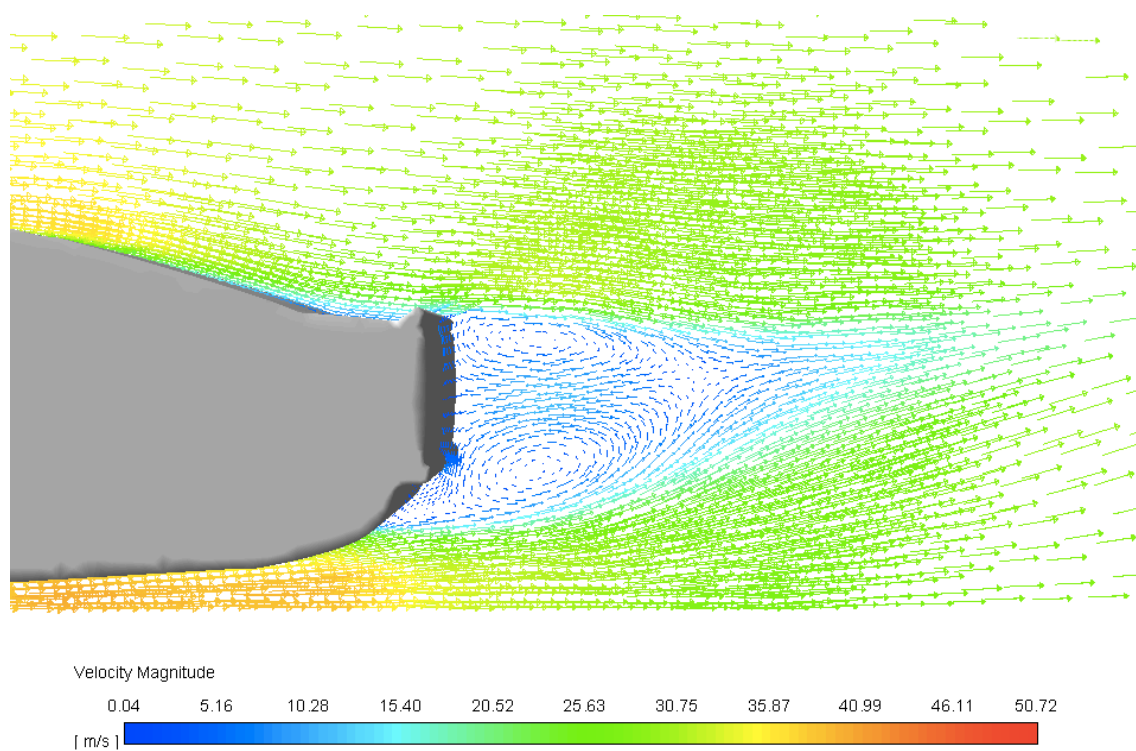
S'observa com el flux d'aire s'accelera al sostre i la part inferior del capó, encara que la màxima acceleració del flux es produeix al fons pla i a l'entrada del difusor, veient així l'efecte del nou element instal·lat en aquest prototip de cotxe esportiu.

Es pot veure també com el despreniment de la capa límit es retarda i té lloc més tard que en el cas del vehicle convencional. Tampoc es produeix cap despreniment a la sortida del difusor tal i com es preveia.





*Figura 71: Vectors velocitat del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*



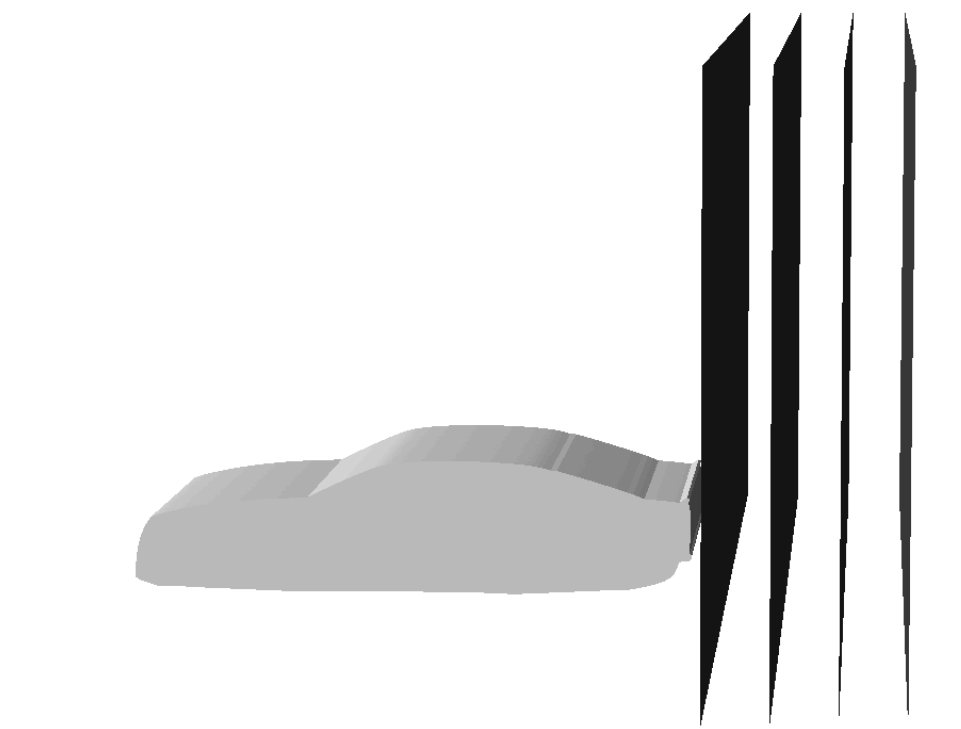
*Figura 72: Detall dels vectors velocitat a la part del darrera del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*

Mitjançant les darreres imatges, es pot veure clarament l'existència de la recirculació del flux d'aire formant dos remolins a la part del darrera del vehicle on es produeix el deixant.

Per tal de poder analitzar i seguir l'evolució dels remolins transversals que es formen quan el flux d'aire travessa el vehicle, s'han creat 4 plans transversals al llarg del deixant, perpendiculars a la direcció del flux.

Aquests plans estan separats entre sí una distància de 0,5 m l'un de l'altre, mentre que el primer es troba separat 0,2 m de la part del darrera del vehicle.

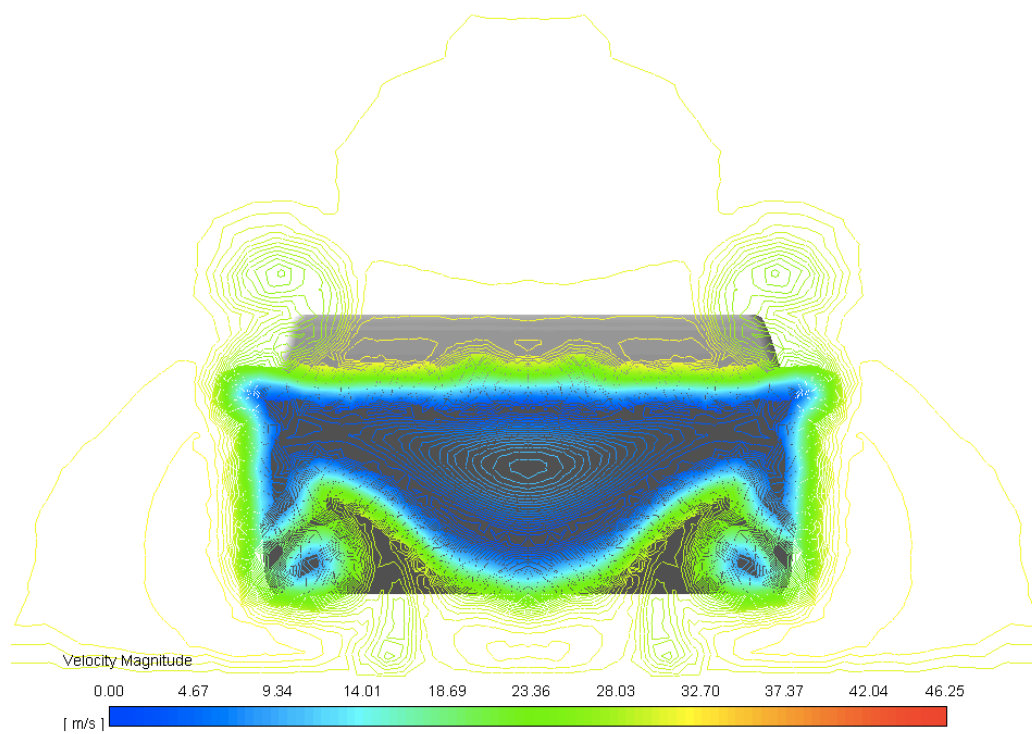
A continuació es mostra com ha sigut la distribució d'aquests plans:



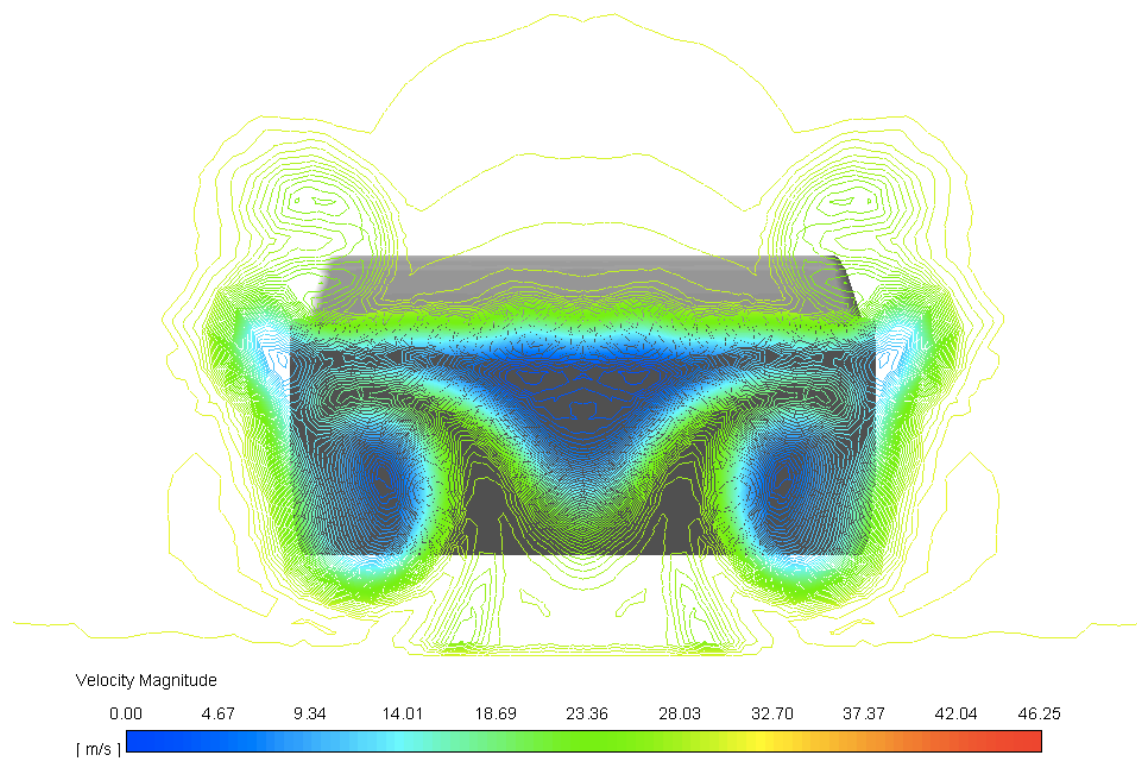
*Figura 73: Plans creats a la zona del deixant del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*

Un cop creats aquests plans, s'ha procedit a representar, sobre cadascun d'ells, el camp de velocitats que té lloc en la zona transversal del vehicle i poder veure així l'evolució i la intensitat dels remolins que es formen.

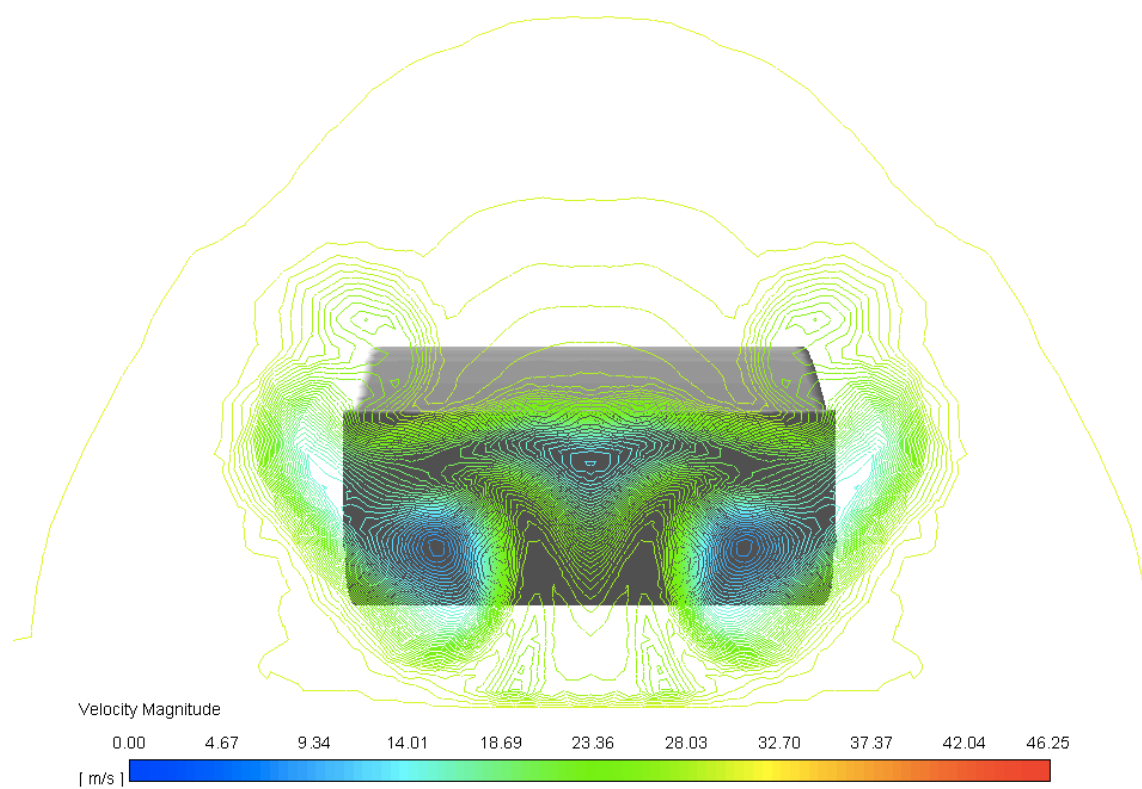
Seguidament, es mostren els gràfics de velocitat obtinguts per cada pla:



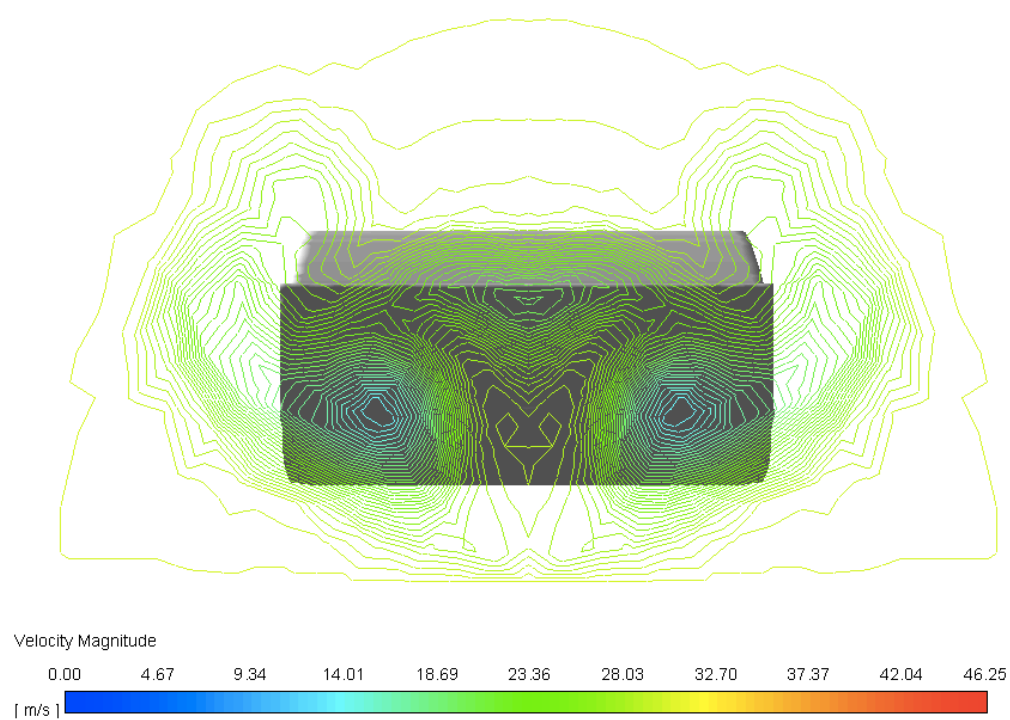
*Figura 74: Distribució de velocitats representada al primer pla [Font pròpia]*



*Figura 75: Distribució de velocitats representada al segon pla [Font pròpia]*



*Figura 76: Distribució de velocitats representada al tercer pla [Font pròpia]*



*Figura 77: Distribució de velocitats representada al quart pla [Font pròpia]*

A partir dels gràfics anteriors es pot observar com, a mesura que s'avança pel deixant, els remolins formats a la zona inferior de la part del darrera del vehicle, es van fent cada cop més grans i no arriben a desaparèixer ni a més de 2 metres del final del cotxe.

En canvi, els remolins que es formen a la part lateral del sostre sí comencen a desaparèixer per la zona on es situa el pla més allunyat del vehicle.

### 6.3.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics

Els resultats obtinguts dels paràmetres aerodinàmics un cop ha convergit la solució i s'ha observat que es mantenen constants són els següents:

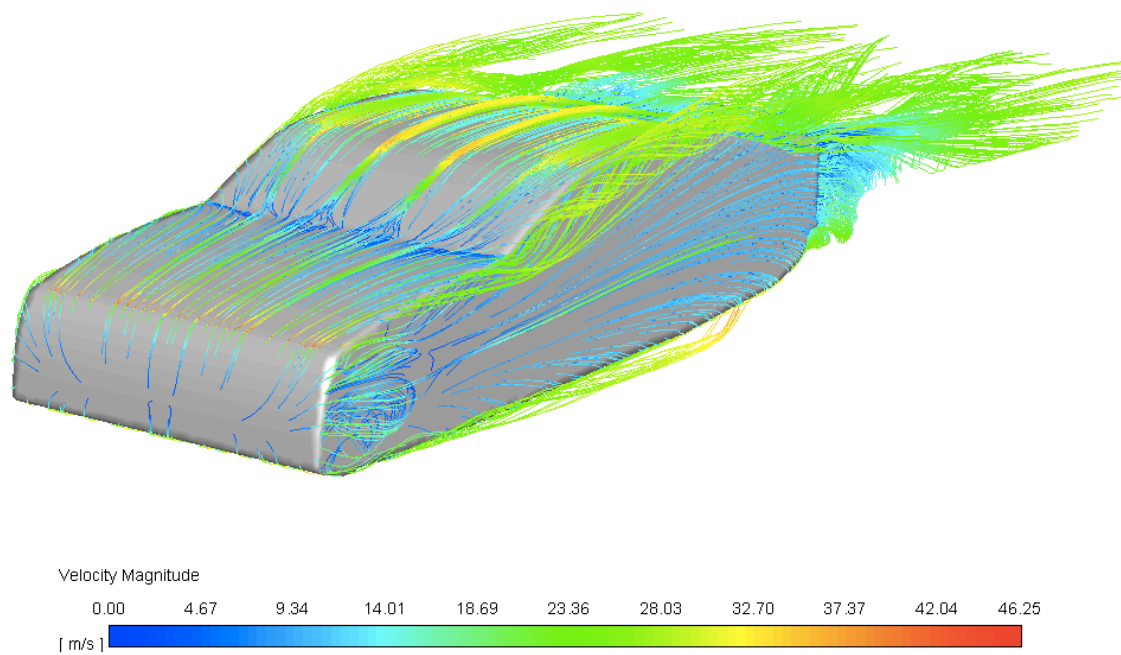
|       |        |
|-------|--------|
| $c_L$ | -1,153 |
| $c_D$ | 0,326  |

En el cas d'aquest prototip de vehicle esportiu, a diferència del prototip de cotxe convencional, es genera sustentació negativa a sobre del vehicle fent que aquest tingui una major adherència al terra i una millor passada per corba.

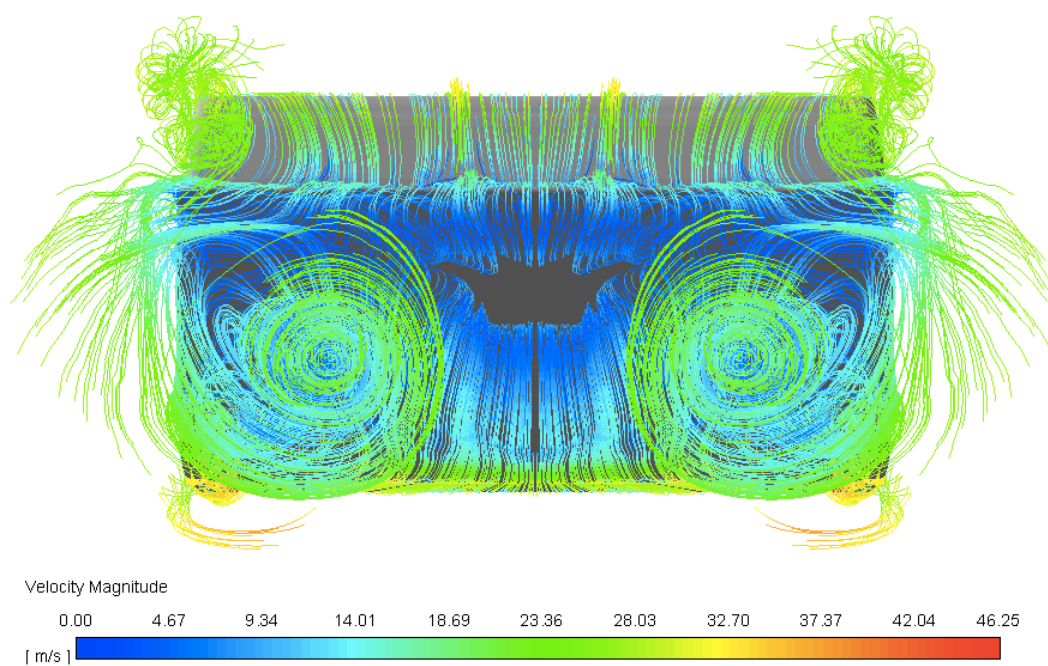
Pel que fa al coeficient de resistència a l'avanç, aquest també resulta ser lleugerament menor que pel model estudiat anteriorment. Una menor resistència a l'avanç, implica que el vehicle pot aconseguir una major velocitat sense la necessitat d'incorporar un motor de més potència.

Finalment, s'han representat les línies de corrent al voltant del vehicle:





*Figura 78: Línies de corrent del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*

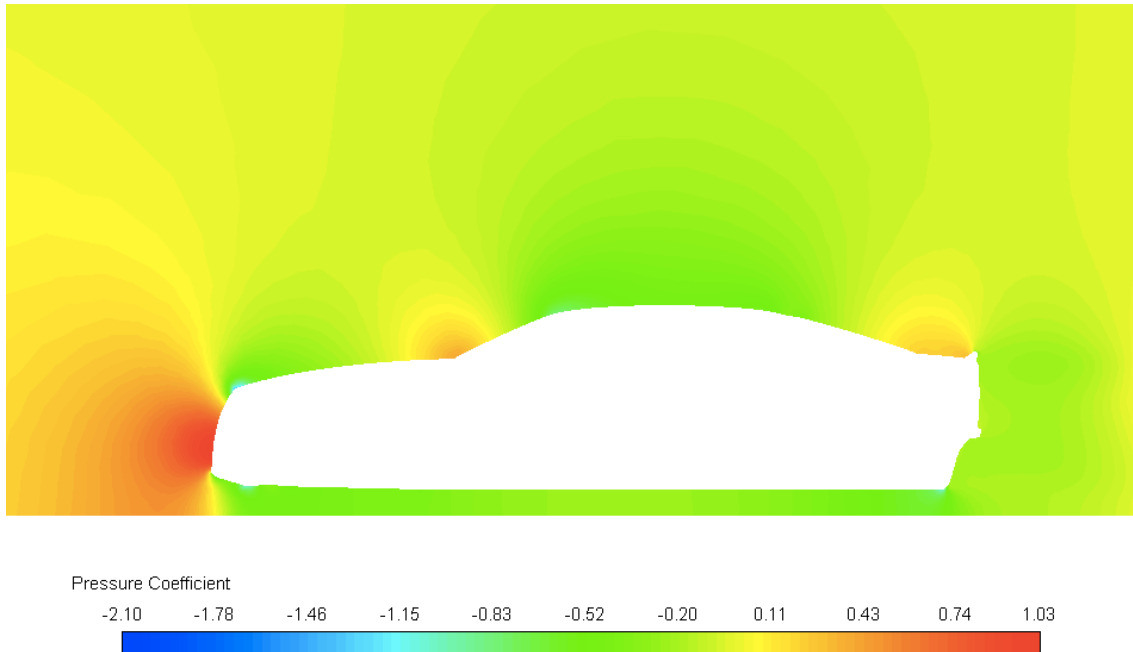


*Figura 79: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del prototip de cotxe esportiu [Font pròpia]*

## 6.4. Estudi del model sense difusor

### 6.4.1. Camp de pressions

A continuació es mostra el camp de pressions representat amb el coeficient de pressió:

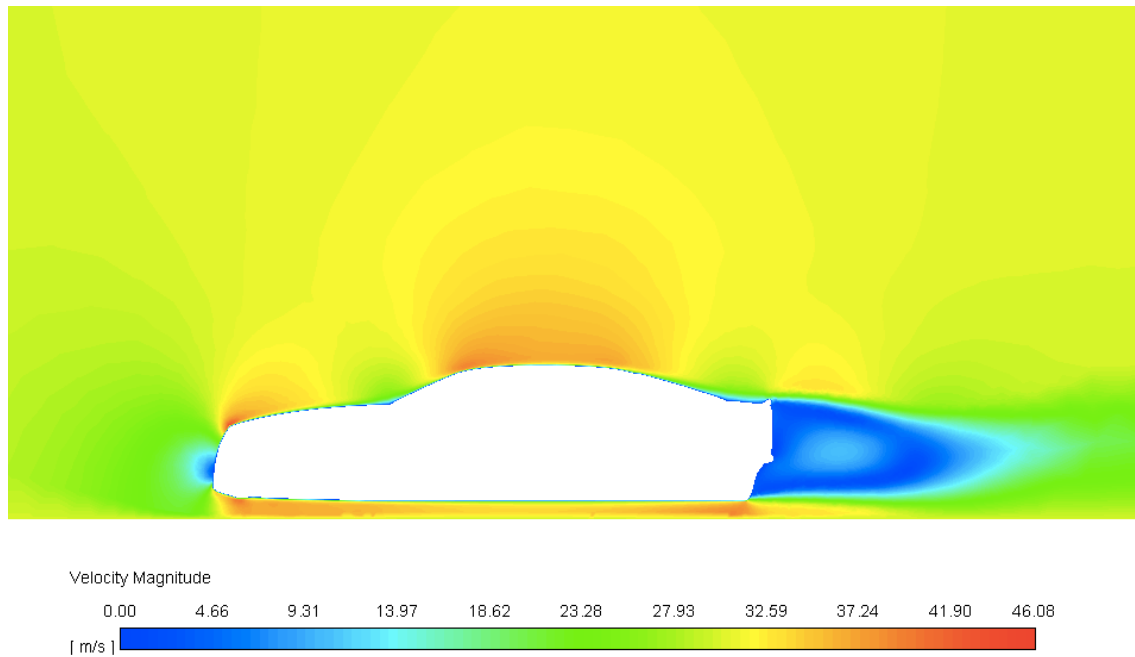


*Figura 80: Distribució de pressions del prototip sense difusor [Font pròpia]*

Pel que fa a la distribució de pressions, s'observa com el fet de no tenir difusor no provoca canvis significatius en les pressions al voltant del vehicle. Tot i això, la màxima depressió (en valor absolut) és major que l'obtinguda en el cas anterior amb el difusor.

### 6.4.2. Camp de velocitats

Seguidament s'ha representat el camp de velocitats pel model en estudi:



*Figura 81: Camp de velocitats del prototip sense difusor [Font pròpia]*

S'observa com ara la zona del deixant és molt més ampla que abans, influint de manera negativa a la formació de més remolins i turbulències.

També cal remarcar que el flux s'accelera al final de la part de sota del vehicle encara que no de la mateixa manera com ho fa quan la geometria disposa del difusor.



### 6.4.3. Línies de corrent i paràmetres aerodinàmics

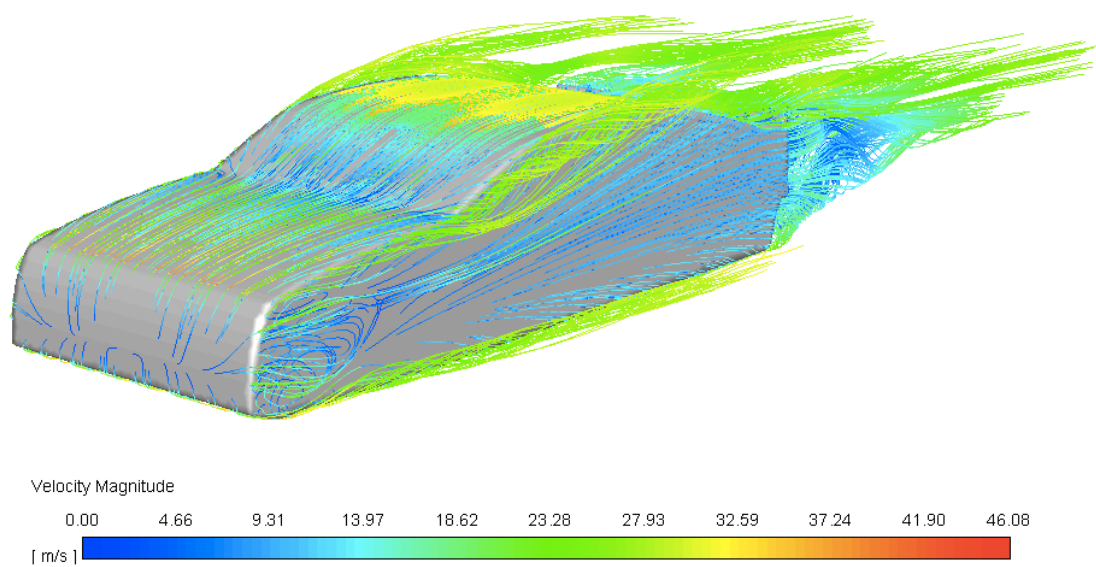
Els resultats obtinguts dels paràmetres aerodinàmics un cop ha convergit la solució i s'ha observat que es mantenen constants són els següents:

|       |        |
|-------|--------|
| $c_L$ | -0,812 |
| $c_D$ | 0,354  |

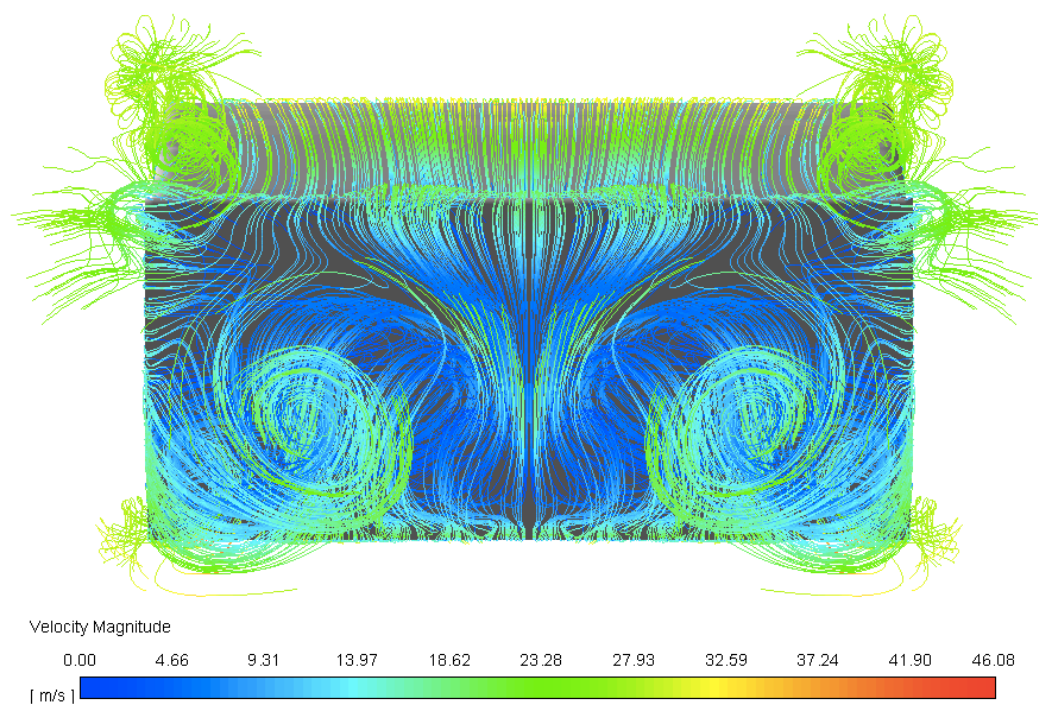
En aquesta nova geometria del Chevrolet Camaro SS sense incloure el difusor, s'observa com s'ha reduït la força de sustentació respecte al model anterior. Encara que aquesta sustentació segueix sent negativa (*downforce*), és un 30 % inferior, aproximadament i en valor absolut, respecte a portar incorporat el difusor.

En referència al coeficient de resistència a l'avanç, aquest no s'ha vist pràcticament alterat respecte a l'obtingut en el cas anterior ja que l'incloure o no un difusor no suposa ni un augment ni una disminució significant de la resistència a l'avanç del vehicle. No obstant, si s'eliminés el fons pla junt amb el difusor, el coeficient de resistència a l'avanç sí que es veuria fortament incrementat ja que el flux d'aire impactaria amb tots els elements mecànics situats en aquesta zona dificultant l'avançament del vehicle.

Anàlogament al cas anterior, s'han representat les línies de corrent al voltant del vehicle:



*Figura 82: Línies de corrent del prototip sense difusor [Font pròpia]*



*Figura 83: Detall de les línies de corrent a la part del darrera del prototip sense difusor [Font pròpia]*

## 7. Anàlisi de resultats

Per tal de poder donar validesa als resultats obtinguts un cop realitzades les simulacions dels prototips, s'ha procedit a comparar aquests resultats amb els valors típics dels vehicles actuals.

Primerament, s'han comparat els valors dels coeficients aerodinàmics tant del prototip de vehicle convencional sense spoiler com del prototip de Chevrolet Camaro SS amb difusor, amb els valors reals.

A continuació, s'ha comparat la distribució de pressions real d'un vehicle amb spoiler amb la obtinguda pel prototip de vehicle convencional amb spoiler.

### 7.1. Model convencional sense spoiler i model esportiu amb difusor

Segons la font [9] s'ha trobat que el valor del coeficient de resistència a l'avanç per un automòbil convencional i un automòbil esportiu modern es troba en 0,3 i 0,35 respectivament.

Per altra banda, el valor del coeficient de sustentació per un vehicle convencional i un esportiu es troba en 0,3 i [ -0,5 : -2 ] respectivament segons la font [9].

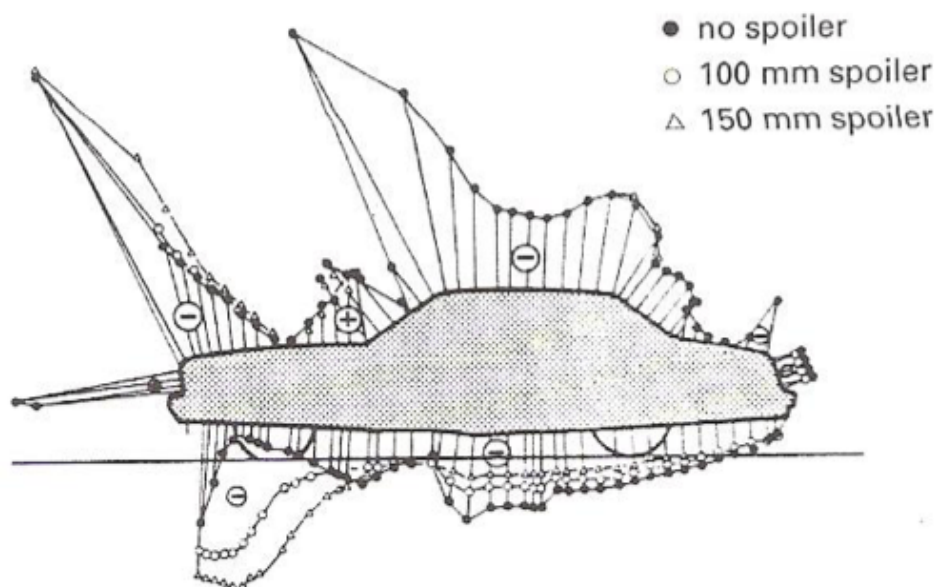
A la següent taula es comparen els valors dels coeficients aerodinàmics trobats pels prototips esmentats anteriorment amb els valors reals:

|       | Prototip sense spoiler | Vehicle real sense spoiler | Prototip Chevrolet Camaro SS | Chevrolet Camaro SS |
|-------|------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|
| $c_L$ | 0,386                  | 0,3                        | -1,153                       | -0,6                |
| $c_D$ | 0,439                  | 0,3                        | 0,326                        | 0,35                |

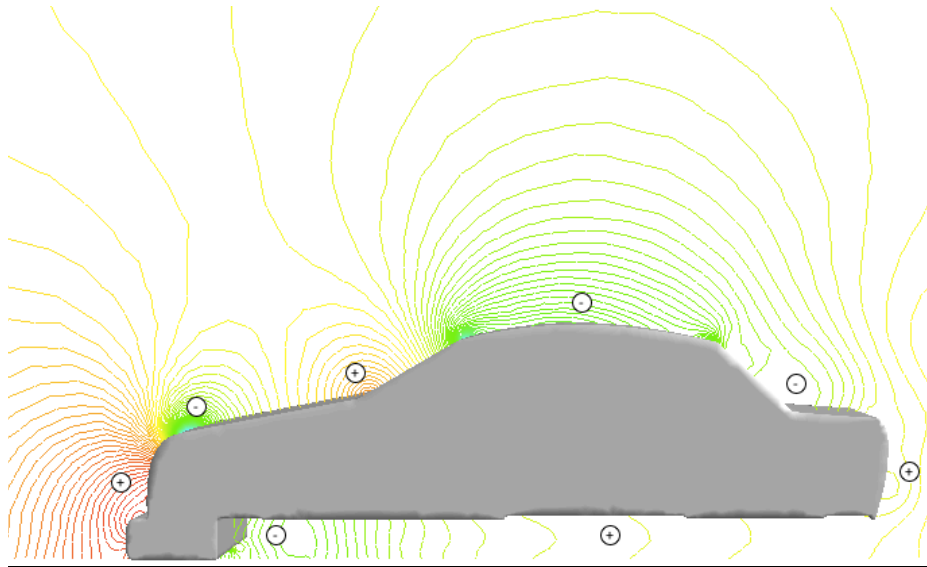
Es pot concloure així que els ordres de magnitud dels valors obtinguts després de les simulacions, tot i les simplificacions que s'han realitzat pels diferents prototips, són coherents i acceptables ja que no disten gaire del seu valor real, exceptuant el valor del coeficient de sustentació del Chevrolet Camaro SS on sí s'aprecia una diferència notable entre el valor obtingut i el valor real degut al fet de no haver inclòs les rodes al prototip.

## 7.2. Model convencional amb spoiler

A continuació és representa la distribució de pressions obtinguda pel prototip així com la distribució de pressions real d'un vehicle convencional:



*Figura 84: Distribució de pressions real d'un cotxe convencional amb i sense spoiler [1]*



*Figura 85: Distribució de pressions obtinguda del prototip de cotxe convencional amb spoiler [Font pròpia]*

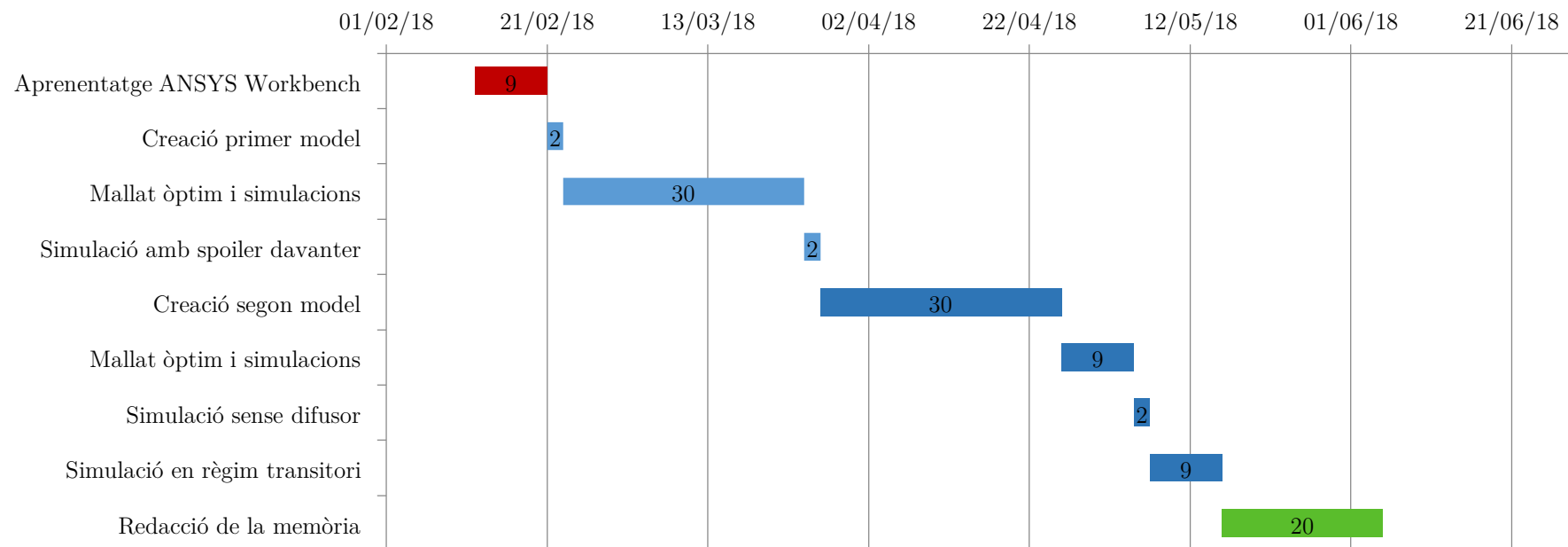
Es pot observar com el camp de pressions obtingut pel prototip és idèntic al que es dona a la realitat i que la màxima depressió apareix a la part del darrera de l'spoiler (sabent que el color vermell indica màxima pressió positiva mentre que el color verd blavós indica la màxima pressió negativa).

A la Figura 52 es pot observar millor aquesta distribució de pressions així com el valor que pren el coeficient de pressió per a cadascuna de les parts del prototip.

## 8. Planificació

A continuació es mostra la planificació seguida per a la realització del present projecte amb totes les fases de realització d'aquest, tot indicant el temps emprat a cadascuna d'elles i mesurat en dies de treball. Aquesta representació s'ha fet mitjançant un Diagrama de Gantt i es preveu la implantació del projecte a partir del mes de setembre d'aquest any ja que és quan comença el nou curs docent:

### Durada del projecte



## 9. Impacte econòmic

Per tal de mostrar la despesa que ha suposat el present projecte i quin és el cost total, s'ha realitzat un estudi econòmic tenint en compte diferents partides econòmiques:

- **Costos d'enginyeria:** referents a les hores de feina (400 hores en total) i els coneixements de l'enginyer autor del projecte i que ha dut a terme tot l'estudi.

Les hores de feina provenen, tant del temps emprat en les simulacions (134 hores en total) i el cost de les quals s'ha calculat com el consum energètic que ha suposat tenir l'ordinador engegat tot aquest temps (28 kWh en total), com el temps emprat per la justificació i representació dels resultats obtinguts (264 hores en total).

També s'han tingut en compte, en aquest apartat, els costos que suposa el desplaçament en transport públic per anar a la universitat i utilitzar els programes necessaris per la realització de l'estudi.

- **Costos de maquinària:** referents als dos ordinadors, un de sobretaula i un portàtil, que s'han utilitzat per la realització del projecte.
- **Costos de software:** referents a les llicències dels diferents programes utilitzats tant per l'estudi com per a la redacció del projecte.

La suma d'aquests costos incloent un fons per imprevistos i aplicant l'impost sobre el valor afegit (IVA) dona lloc al cost total del projecte.

A continuació es representen totes aquestes partides econòmiques amb el seu respectiu valor en una taula:

|               | CONCEPTE                                  |   | PREU         | TEMPS   | IMPORT      |
|---------------|---|---|--------------|---------|-------------|
| Enginyeria    | Honoraris                                 | Hores de treball  | 20 €/h       | 264 h   | 5.280 €     |
|               |   | Hores de simulació  | 0,15 €/kWh   | 136 h   | 4,2 €       |
|               | Mobilitat                                 |   | 155 €/3mesos | 4 mesos | 206,67 €    |
|               | Subtotal                                  |   |              |         | 5.490,87 €  |
|               | CONCEPTE                                  |   |              |         | IMPORT      |
| Maquinària    | HP Compaq Elite 8300                      |   |              |         | 327 €       |
|               | MacBook Air 13"                           |   |              |         | 1.105 €     |
|               | Subtotal                                  |   |              |         | 1.432 €     |
|               | CONCEPTE                                  |   |              |         | IMPORT      |
| Software      | ANSYS Workbench 18.1 (versió estudiantil) |   |              |         | 2.500 €     |
|               | SolidWorks 2016 (versió completa)         |   |              |         | 8.100 €     |
|               | Paquet Office Mac                         |   |              |         | 149 €       |
|               | Keynote                                   |   |              |         | Gratuït     |
|               | Subtotal                                  |   |              |         | 10.749 €    |
|               | CONCEPTE                                  | DESCRIPCIÓ  |              |         | IMPORT      |
| Costos totals | Cost total                                | Cost d'enginyeria + cost de maquinària + cost de software |              |         | 17.671,34 € |
|               | Imprevistos                               | 10 % del cost total                                       |              |         | 1.767,13 €  |
|               | Total abans d'impostos                    | Cost total + imprevistos                                  |              |         | 19.438,47 € |
|               | IVA                                       | 21% del total a.i.  |              |         | 4.082,08 €  |



## 10. Impacte ambiental

El fet d'haver realitzat l'estudi aerodinàmic dels diferents prototips mitjançant CFD i no un túnel de vent, ha suposat un gran estalvi energètic. Així doncs, l'impacte negatiu que ha tingut aquest projecte sobre el mediambient és molt petit i és degut a l'electricitat consumida pels ordinadors durant el temps de realització del projecte.

Per tal de poder calcular les emissions de CO<sub>2</sub> associades a la generació d'aquesta electricitat consumida, s'ha utilitzat el *mix elèctric*, un indicador de les fonts energètiques que s'utilitzen per produir l'electricitat.

L'estimació d'aquest indicador la realitza l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic, seguint la mateixa metodologia amb que la Comissió Nacional dels Mercats i la Competència (CNMC) estima la informació referent a l'origen de l'electricitat i el seu impacte de CO<sub>2</sub>. D'aquesta manera, el *mix* de la xarxa elèctrica peninsular de 2017 (valor més actual registrat a la pàgina web de la Generalitat de Catalunya) s'estima en 392 g CO<sub>2</sub>/kWh.

Com s'ha calculat a l'apartat anterior, sabent que el consum mitjà de la CPU dels ordinadors en ON és de 50,56 W i que el consum mitjà de la pantalla és de 18,84 W, el valor total de kWh un cop comptabilitzades les hores de treball i de simulació (400 hores en total) ascendeix a 28 kWh aproximadament.

D'aquesta manera, amb aquest projecte s'han generat aproximadament **11 kg CO<sub>2</sub>**.

## 11. Conclusions

Amb la realització d'aquest projecte, s'han assolit els objectius marcats inicialment encara que amb molt d'esforç degut al programari de CAD i CFD utilitzat. Aquest programari és molt potent però requereix un gran domini d'aquest per poder-lo utilitzar correctament i entendre totes les funcionalitats que ofereix, i aquest domini del programari només s'aconsegueix a base de constància i dedicació.

Cal destacar que, aconseguir el millor mallat per tal que al realitzar la simulació del prototip aquesta convergeixi, ha estat la tasca més difícil amb diferència i la que més temps ha requerit durant la realització del projecte. És per aquest motiu que s'ha realitzat un estudi de sensibilitat de la malla a l'inici del projecte, on s'han mostrat els mallats **més significatius** dels molts que s'han creat abans d'obtenir el que s'ha cregut que és l'òptim.

Finalment, un cop s'ha pogut crear un mallat molt bo, si més no, el millor que es pot obtenir amb la versió estudiantil de l'ANSYS Workbench utilitzada, s'han analitzat els resultats per tal d'encaminar i tenir idees per realitzar el manual de les pràctiques d'aerodinàmica.

Una vegada analitzats els resultats a l'apartat 7, es pot concloure que el model de cotxe convencional creat s'ajusta molt bé amb la realitat i és per això que s'ha decidit enfocar les pràctiques entorn aquest model i fer que els estudiants analitzin aquest model i comprovin diversos aspectes aerodinàmics proposats al manual de pràctiques que es mostra als Annexos.

Per tant, aquest projecte i les simulacions realitzades serviran als alumnes per que aprenguin a fer un estudi aerodinàmic d'un vehicle, tinguin la capacitat d'incloure millores aerodinàmiques al prototip, entenguin els diferents fenòmens que esdevenen i, sobretot, que els visualitzin de manera gràfica tot entenent com es comporta el flux d'aire al voltant del vehicle.

## 12. Bibliografia

### Llibres:

- [1] Hucho, W.H. (1990). *Aerodynamics of road vehicles*.
- [2] Agueda Casado, E. i altres (2016). *Estructuras del vehículo*.
- [3] Barnard, R.H. (2001). *Road Vehicle Aerodynamic Design*.
- [4] Katz, J. (1995). *Race Car Aerodynamics*.

### Treballs de fi de grau/carrera:

- [5] Carbonell Romero, P. (2014). *Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un audi R8 mediante técnicas CFD*. Treball de fi de grau. València: Universitat Politècnica de València,  
<[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53830/TFGEntregar\\_14361686009511884620932784413136.pdf?sequence=2](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53830/TFGEntregar_14361686009511884620932784413136.pdf?sequence=2)> [Consulta: 10 de març de 2018]
- [6] Mateos Corona, J.L. (2017). *Estudio y diseño aerodinámico de un fondo plano para un vehículo Formula Student*. Treball de fi de carrera. Sevilla: Universitat de Sevilla,  
<<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60395/fichero/PFC+Jose+Luis+Mateos+Estudio+y+Diseño+de+un+fondo+plano+para+un+vehículo+Formula+Student.pdf>> [Consulta: 18 de març de 2018]

### Pàgines web:

- [7] Technical Courses. *Estudio de la aerodinámica de un vehículo*.  
<[http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog\\_entrada.php?entrada\\_id=89](http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89)> [Consulta: 4 de maig de 2018]
- [8] Altamirano, J. *Ingeniería automotriz*.  
<<http://rjose1994.blogspot.com.es/2013/07/aerodinamica-de-autos.html>>  
[Consulta: 4 de maig de 2018]
- [9] *Anexo: Cx de automóviles*.  
<[https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Cx\\_de\\_automóviles](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Cx_de_automóviles)> [Consulta: 30 de maig de 2018]

[10] *Google images*.

<<https://images.google.com>> [Consulta: 16 de maig de 2018]

## Tutorials:

[11] Youtube, “Part 2a – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=ZDWvZ6UO0hI>> [Consulta: 18 de febrer de 2018]

[12] Youtube, “Part 2b – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=VND--aEIBA4>> [Consulta: 18 de febrer de 2018]

[13] Youtube, “Part 2c – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=Efe-AuiB6cs>> [Consulta: 18 de febrer de 2018]

[14] Youtube, “Part 3a – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<[https://www.youtube.com/watch?v=p\\_1eostB3WY](https://www.youtube.com/watch?v=p_1eostB3WY)> [Consulta: 19 de febrer de 2018]

[15] Youtube, “Part 3b – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=iQWzoomxjc8>> [Consulta: 19 de febrer de 2018]

[16] Youtube, “Part 3c – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=91bonD180ls>> [Consulta: 19 de febrer de 2018]

[17] Youtube, “Part 3d – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=xbJwdJCcc0Q>> [Consulta: 19 de febrer de 2018]

[18] Youtube, “Part 3e – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=Bznt0q2JtZ4>> [Consulta: 20 de febrer de 2018]

[19] Youtube, “Part 3f – ANSYS Meshing fo Vehicle Aerodynamics” en *Youtube*.

<<https://www.youtube.com/watch?v=x6xmurZBQT4>> [Consulta: 20 de febrer de 2018]

Treball de Fi de Grau

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Estudi aerodinàmic de la part frontal d'un vehicle**

**ANNEXOS**

**Autor:** Adrián González López  
**Director:** Esteve Jou Santacreu  
**Convocatòria:** Juny 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



# Manual de la pràctica

## Objectiu

Amb aquesta pràctica es pretén que els alumnes realitzin l'estudi aerodinàmic d'un prototip de vehicle convencional, sense incloure les rodes degut a la complexitat i temps de dedicació que requereixen, mitjançant el programa ANSYS Workbench i l'arxiu sim.zip proporcionat.

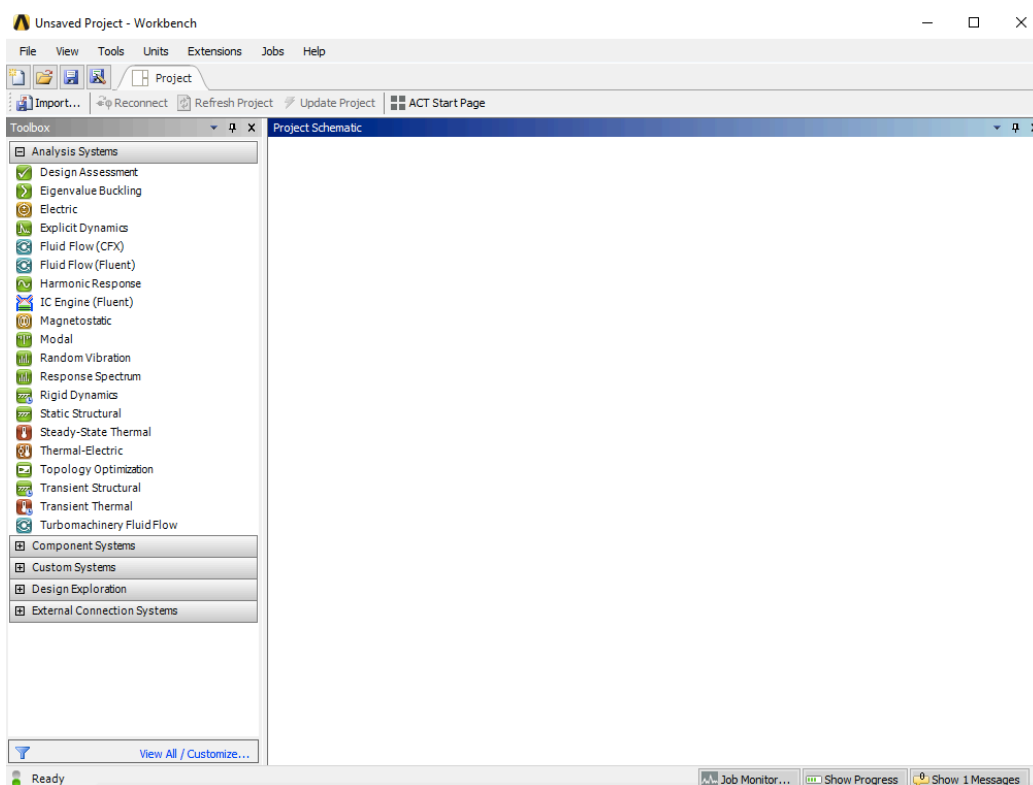
## Guió per la simulació

### Importació de l'arxiu amb la geometria mallada

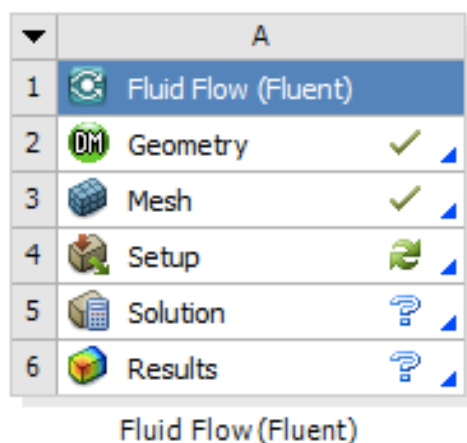
Primerament, s'ha de descomprimir l'arxiu **sim.zip** i ubicar tots els arxius que conté a l'escriptori de l'ordinador.

Seguidament, per tal d'entrar al programari, s'ha de buscar **ANSYS Workbench 16.2** al buscador de Microsoft i accedir-hi.

Un cop dins del programa apareixerà la següent finestra:



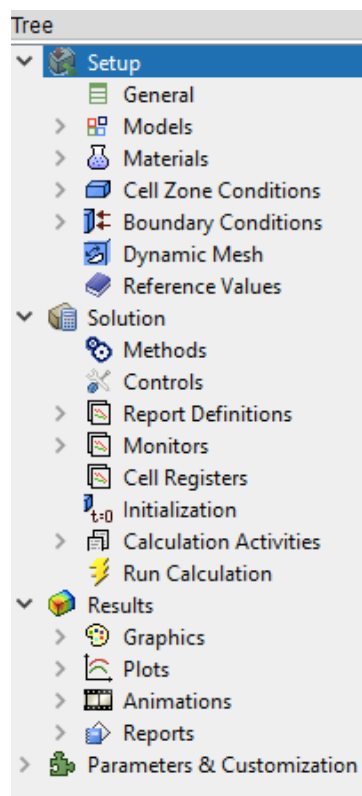
El següent pas és anar a **File** i carregar el projecte **sim.wbpj** que es troba dins de l'arxiu **sim.zip**. Aleshores apareixerà la següent finestra:



S'ha d'accedir a l'opció **Setup** fent doble clic i clicar **OK** amb l'opció **Double Precision** desmarcada.

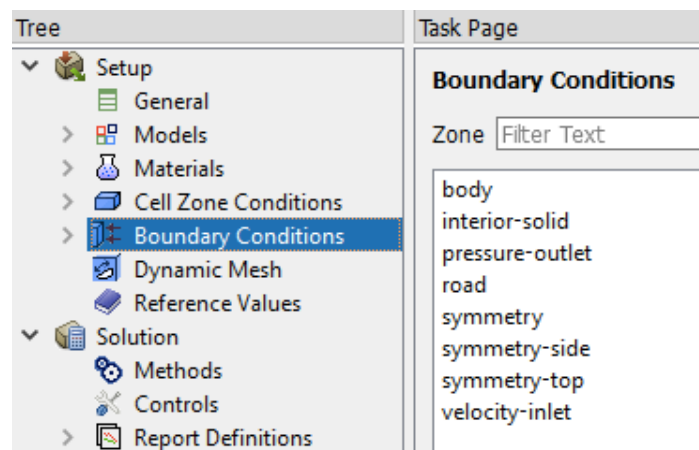
#### Definició del model de turbulència i les condicions de contorn

Un cop dins ens apareixerà la següent pantalla:



S'ha de definir el model de turbulència a l'opció **Models>Viscous>k-epsilon** i deixar les opcions que apareixen per defecte.

Seguidament s'han d'afegir les condicions de contorn a l'opció **Boundary Conditions**:



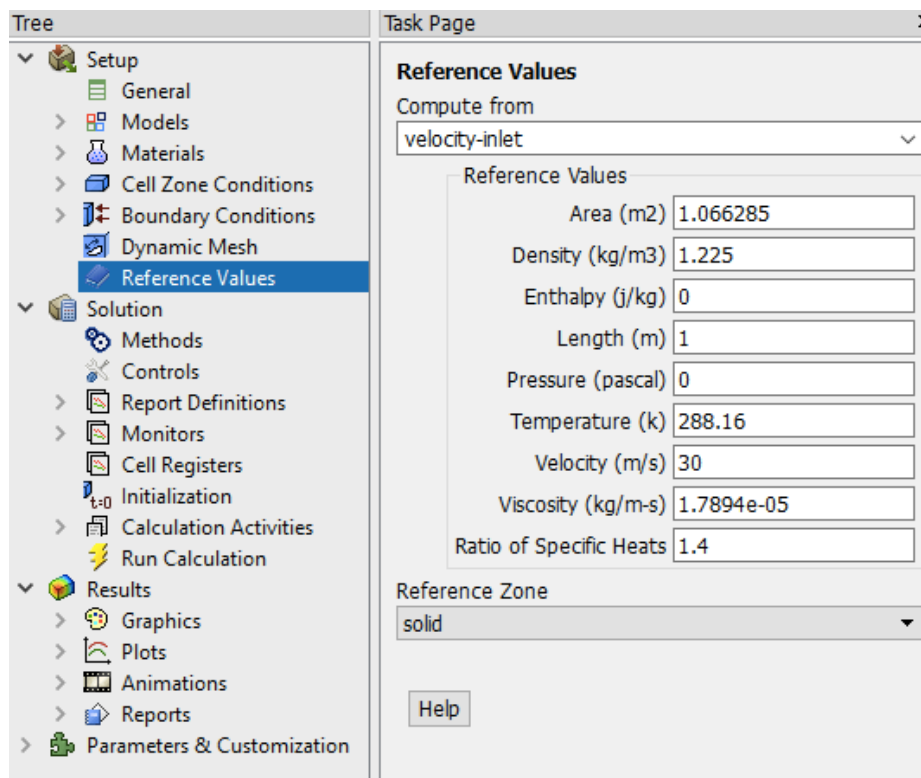
Clicar a sobre de **velocity-inlet** i seleccionar la velocitat de l'aire, a la mateixa pantalla, posar una intensitat turbulenta i un rati de viscositat turbulenta iguals a la unitat.

Ara és necessari posar la condició de lliscament en la part inferior del vehicle, per fer-ho, clicar a sobre de **road**, seleccionar **Moving Wall** i tornar a seleccionar la velocitat de l'aire, aquest cop, deixant la resta d'opcions predeterminades.

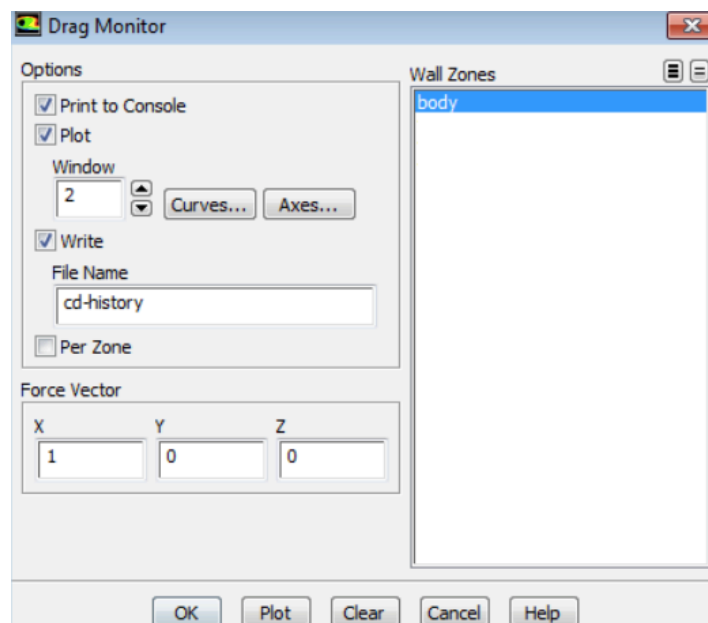
### Inicialització de la simulació

Seguidament, s'han d'indicar els valors de referència per la simulació, en l'opció **Reference Values** i posar els valors que es mostren a continuació:



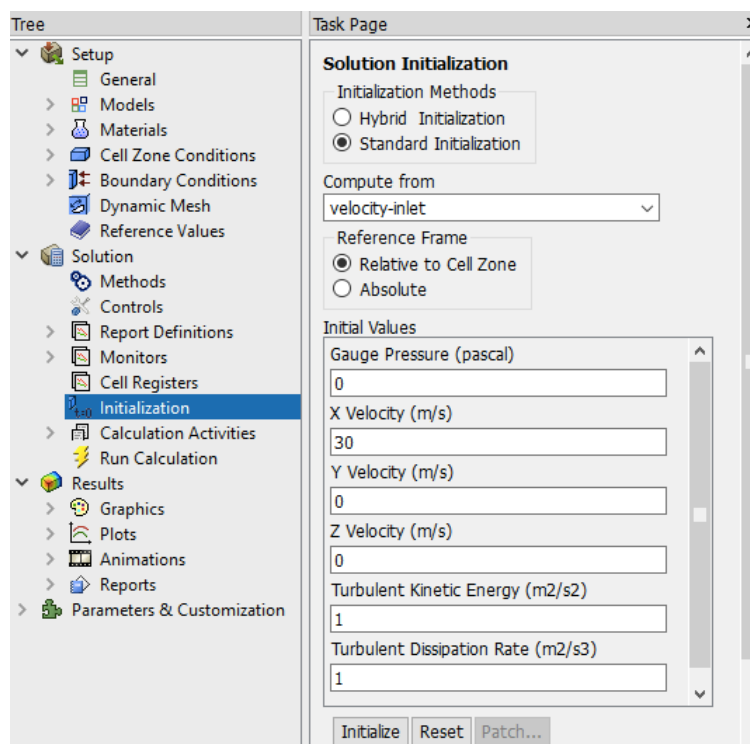


Per tal que el programa mostri el valor dels coeficients aerodinàmics, s'ha d'anar a l'opció **Monitors>Drag>Edit...** i seleccionar el que es mostra a continuació:



Anàlogament, realitzar la mateixa operació pel **Lift**.

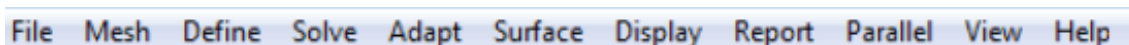
Per tal d'inicialitzar la simulació, seleccionar l'opció **Initialization**, seleccionar els valors que es mostren a continuació i clicar a **Initialize**:



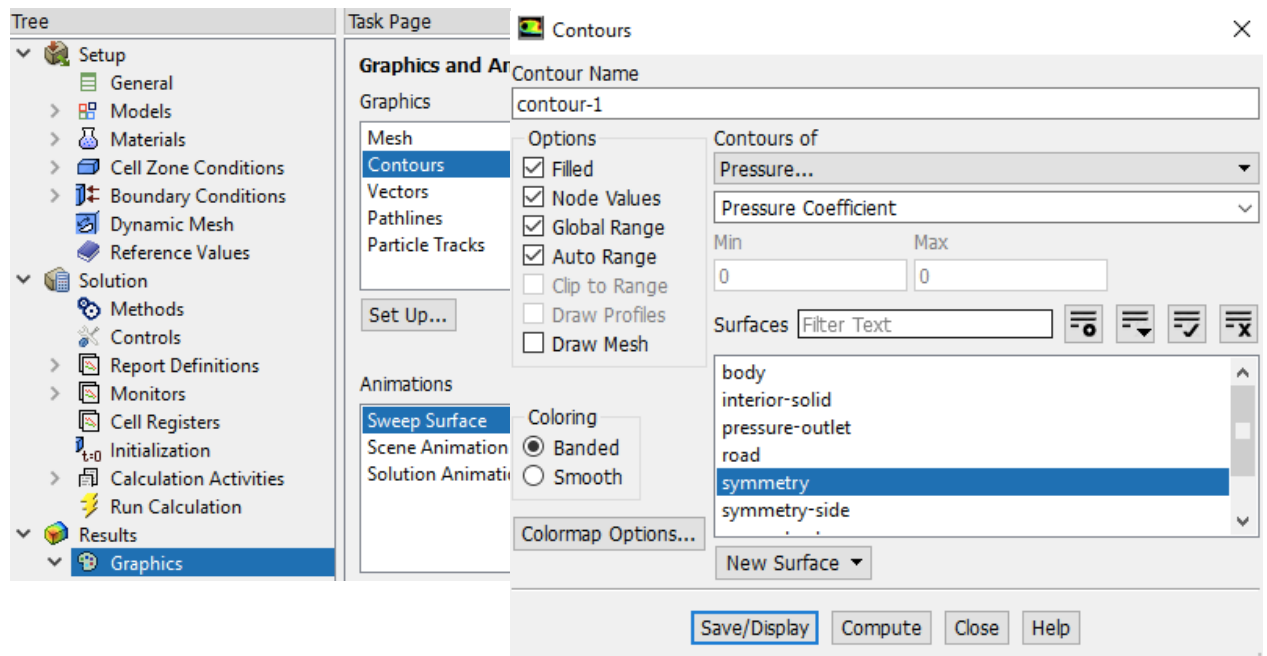
Finalment, seleccionar l'opció **Run Calculation**, posar **1000** iteracions i clicar a **Calculate**.

### Visualització dels resultats

Per tal que es mostri el vehicle complet, seleccionar **Display>Views>symmetry>Apply** a la barra d'eines:

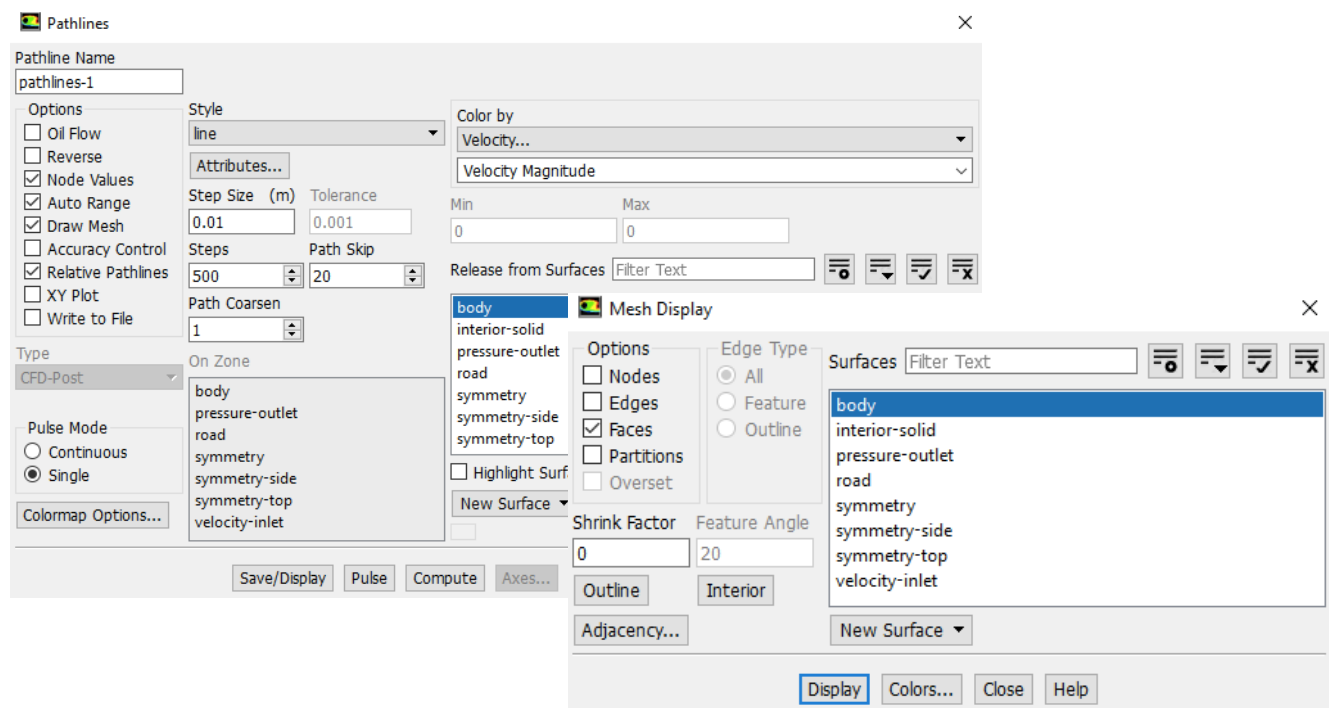


Un cop hagi convergit la solució (després d'uns 20 – 30 min), per tal de representar la distribució de pressions, seleccionar **Graphics** i marcar les següents opcions:



Anàlogament, per representar el camp de velocitats fer la mateixa operació però seleccionant **Velocity**.

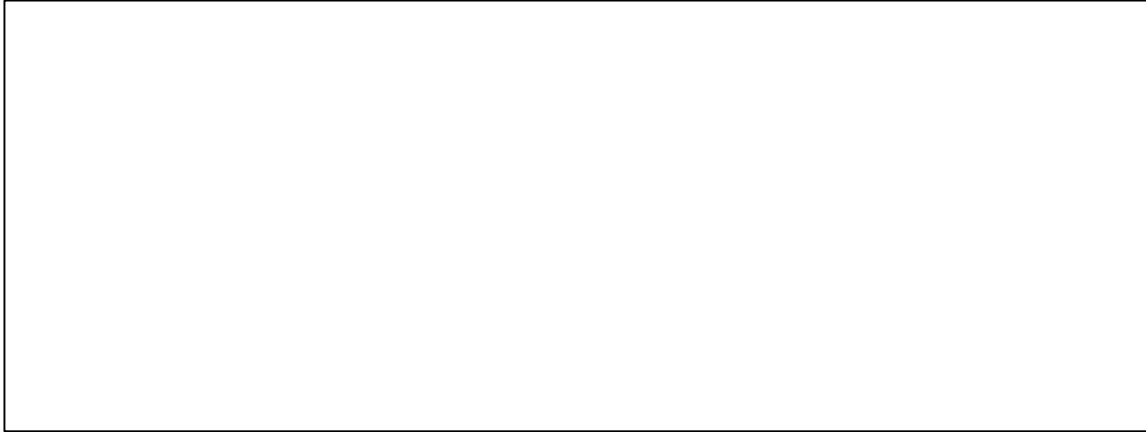
Finalment, per tal de representar les línies de corrent, seleccionar el gràfic de **Pathlines** i marcar les següents opcions:



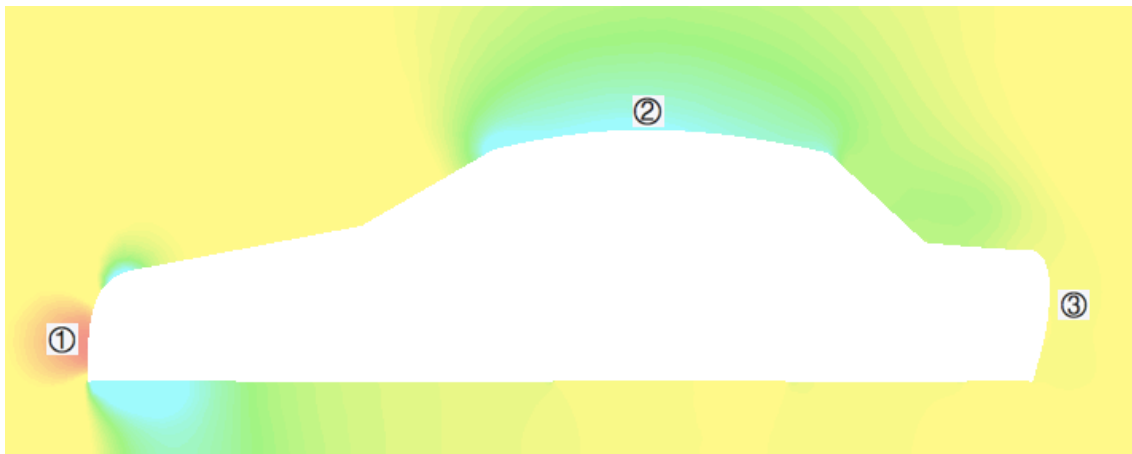
## Qüestionari

Essent la velocitat de l'aire incident al prototip de **30 m/s**, es demana:

-Obtenir el diagrama de pressions:



-Quin és el valor del coeficient de pressió als punts 1, 2 i 3 del vehicle marcats a continuació? (aquest hauria de valdre aproximadament 0,9 , -0,7 i 0 a cada punt respectivament).

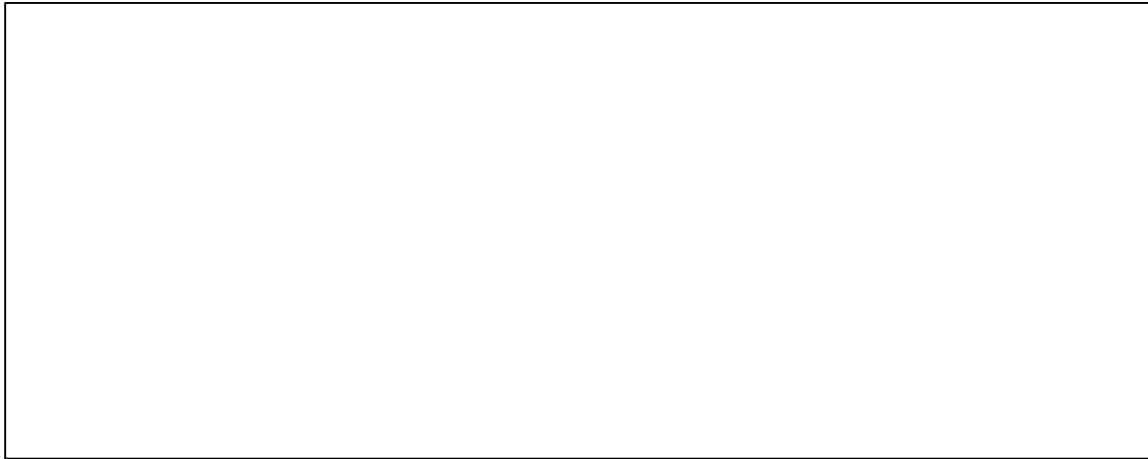


-Es correspon la distribució de pressions a la que s'esperaria obtenir a la realitat? Per què?

-Obtenir el diagrama de velocitats al voltant del vehicle:

-Quan i per què es produeix el desprendiment de la capa límit? Es pot apreciar el deixant? En cas afirmatiu indicar com és aquest.

-Representar les línies de corrent al voltant del vehicle:



-A quines parts del vehicle apareixen remolins? A què són deguts?



-Es podria incorporar algun element a la geometria del vehicle per tal de millorar la seva aerodinàmica a la part frontal? Com hauria de ser i per què?

